

N° d'ordre : .....

## THESE

Préparée au  
**Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS**

présentée pour obtenir

**LE TITRE DE DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE**

École doctorale : Systèmes  
Spécialité : Systèmes Industriels

Par M. STOICA Dragoş Constantin  
Ingénieur de l'Université Polytechnique de Bucarest

## **Analyse, représentation et optimisation de la circulation des avions sur une plate-forme aéroportuaire**

Soutenue le 10/12/2004

devant le jury composé de :

M.	FLOQUET Pascal	Président
M.	MORA-CAMINO Félix	Directeur de thèse
M.	ACHAÏBOU Abdelkrim	Codirecteur de thèse
M.	MARÍN GRACIA Ángel	Rapporteur
M.	GUALDA Nicolau Fares	Rapporteur
M.	DE COLIGNY Marc	Membre
M.	DONCESCU Andrei	Membre invité
M.	NGUYEN Vu Duong	Membre invité



## Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été menés au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture de Systèmes de CNRS et dans le cadre du Département Transport Aérien de l'ENAC. Je remercie Madame Louise Traves-Massuyès pour m'avoir accueilli dans l'équipe de recherche DISCO du LAAS-CNRS. Cette thèse a été supportée financièrement par l'ENAC et l'Université Toulouse II – Le Mirail. Je voudrais exprimer mes salutations les meilleures au Monsieur Jean Bresson de l'ENAC et au Monsieur Marc De Coligny de l'Université Toulouse II. Je voudrais remercier Monsieur Roland Morancho, Président de l'Institut National Polytechnique de Toulouse pour son soutien pendant toute la durée de ma thèse et pour sa compréhension.

Je remercie Monsieur Gualda Nicolau Fares et Monsieur Ángel Marín Gracia d'avoir accepté d'analyser ce travail en tant que rapporteurs, pour leur conseils, leurs remarques constructives et pour leurs indications.

Je remercie Monsieur Pascal Floquet d'avoir accepté de juger cette thèse et de présider le jury de thèse. Je voudrais remercier les membres du jury : Monsieur Marc De Coligny, Monsieur Andrei Doncescu et Monsieur Nguyen Vu Duong. Un grand merci pour Monsieur Achaïbou Abdelkrim, le codirecteur de cette thèse, pour le soutien académique et moral pendant toute cette période. Je remercie Monsieur Félix Mora-Camino de m'avoir mis à disposition les moyens techniques et humains du Laboratoire d'Automatique de l'ENAC, pour ses idées, pour les encouragements et le soutien moral constant pendant cette période et d'avoir dirigée cette thèse.

Je voudrais exprimer ma gratitude envers tout mes professeurs, qui m'ont fait confiance et j'espère que l'aboutissement de cette thèse récompense une partie de leur travail. Je voudrais remercier particulièrement Monsieur Radu Burlacu pour avoir guidé mes pas vers l'étude et la science.

Un grand merci pour mon épouse Anca, pour son soutien moral et pour sa patience pendant toute cette période. Sans oublier tout mes amis qui m'ont encouragé et soutenu jusqu'au bout.



*à ma famille,*



# Table de matières

## INTRODUCTION GENERALE

---

### PARTIE 1

## ELEMENTS GENERAUX ET PROBLEMATIQUE

---

<b>CHAPITRE I – LES OBJECTIFS GENERAUX DE GESTION DU TRAFIC DES AVIONS AU SOL.....</b>	<b>19</b>
I.1 INTRODUCTION .....	19
I.2 LES ACTEURS DU TRAFIC AEROPORTUAIRE.....	19
I.3 LES BESOINS DES UTILISATEURS.....	21
I.4 LES SYSTEMES MIS EN ŒUVRE.....	22
<i>I.4.1 La fonction Surveillance .....</i>	<i>23</i>
<i>I.4.2 Le Planning opérationnel .....</i>	<i>23</i>
<i>I.4.3 Le Routage .....</i>	<i>24</i>
I.5 LA NORMALISATION.....	24
I.6 ELEMENTS SUR LES SYSTEMES AVANCES DE GESTION ET CONTROLE DU TRAFIC AU SOL (A-SMGCS).....	26
<i>I.6.1 Leurs objectifs.....</i>	<i>26</i>
<i>I.6.2 Les principales fonctions du A-SMGCS.....</i>	<i>26</i>
<i>I.6.3 La classification des besoins d'automatisation de la gestion de trafic au sol.....</i>	<i>28</i>
<i>I.6.4 Les éléments du système.....</i>	<i>29</i>
<i>I.6.5 Les difficultés de la mise en œuvre et l'impact opérationnel attendu.....</i>	<i>31</i>
I.7 LA SITUATION ACTUELLE .....	33
I.8 CONCLUSION.....	36
<b>CHAPITRE II – L'ORGANISATION PHYSIQUE DE L'AEROPORT ET LA CIRCULATION AU SOL .....</b>	<b>37</b>
II.1 INTRODUCTION .....	37

II.2 L'ORGANISATION GENERALE D'UNE PLATE-FORME AEROPORTUAIRE .....	37
II.3 LES AIRES DE STATIONNEMENT .....	40
II.4 LES AIRES DE TRAFIC (APRONS) .....	45
II.5 LES VOIES DE CIRCULATION .....	45
II.6 LES PISTES .....	47
II.7 LES SORTIES DE PISTES ET LES AIRES DE STOCKAGE .....	49
II.8 CONCLUSION .....	51
<b>CHAPITRE III – LE CADRE OPERATIONNEL DU TRAFIC SOL .....</b>	<b>53</b>
III.1 INTRODUCTION .....	53
III.2 CONSIDERATIONS GENERALES .....	53
III.3 LES SYSTEMES DE SIGNALISATION .....	54
III.4 LES SYSTEMES DE LOCALISATION .....	57
III.5 LES SYSTEMES DE COMMUNICATION .....	59
III.6 PROBLEMES OPERATIONNELS DE LA CIRCULATION AU SOL DES AVIONS .....	60
<i>III.6.1 Problèmes liés à la météorologie .....</i>	<i>60</i>
<i>III.6.2 Les problèmes liés aux performances des avions .....</i>	<i>61</i>
III.7 L'ENJEU DU CONTROLE DE TRAFIC AVION AU SOL .....	63
III.8 EXEMPLE D'ORGANISATION DU POSTE DE CONTROLE DU TRAFIC AU SOL .....	65
<i>III.8.1 Les différentes fonctions associées au contrôle du trafic sol .....</i>	<i>66</i>
<i>III.8.2 Les bandes de progression .....</i>	<i>68</i>
III.9 CONCLUSION .....	69

---

---

## PARTIE 2

# LA CAPACITE AEROPORTUAIRE ET LA CIRCULATION AU SOL

---

---

<b>CHAPITRE IV – LA CAPACITE AEROPORTUAIRE .....</b>	<b>73</b>
IV.1 INTRODUCTION .....	73
IV.2 LE SYSTEME AEROPORTUAIRE ET SA CAPACITE .....	73



---

IV.3 LES FACTEURS INFLUANT SUR LA CAPACITE.....	75
<i>IV.3.1 La capacité des sous systèmes.....</i>	<i>76</i>
IV.4 PREMIERS MODELES DE LA CAPACITE D’UN SYSTEME DE PISTES .....	78
IV.5 EVALUATION STATISTIQUE DE LA CAPACITE AEROPORTUAIRE .....	81
<i>IV.5.1 Une approche statistique globale.....</i>	<i>81</i>
<i>IV.5.2 Critique de l’approche précédente.....</i>	<i>83</i>
<i>IV.5.3 Prise en compte de l’état d’occupation de la plate-forme aéroportuaire.....</i>	<i>85</i>
IV.6 CONCLUSION.....	87
 <b>CHAPITRE V – LES MODELES D’EVALUATION DE LA CAPACITE</b>	
<b>AEROPORTUAIRE .....</b>	<b>89</b>
V.1 INTRODUCTION.....	89
V.2 UN MODELE THEORIQUE DE LA CAPACITE ASSOCIEE AUX PISTES .....	89
<i>V.2.1 Principes retenus par le modèle ASAC.....</i>	<i>90</i>
<i>V.2.2 Traitement des flux dans le modèle ASAC.....</i>	<i>90</i>
<i>V.2.3 Calcul de la capacité par ASAC.....</i>	<i>94</i>
<i>V.2.4 Analyse du modèle ASAC.....</i>	<i>95</i>
V.3 EVALUATION DE LA CAPACITE PAR LA SIMULATION .....	96
<i>V.3.1 Approches macroscopiques .....</i>	<i>96</i>
<i>V.3.2 Approches microscopiques .....</i>	<i>98</i>
<i>V.3.3 Approches mésoscopiques .....</i>	<i>100</i>
V.4 EVALUATION DE LA CAPACITE PAR L’OPTIMISATION .....	106
<i>V.4.1 Le principe mis en œuvre.....</i>	<i>106</i>
<i>V.4.2 Exemple d’approche d’optimisation.....</i>	<i>107</i>
V.5 CONCLUSION .....	110
 <b>CHAPITRE VI – PROPOSITION D’UNE APPROCHE GLOBALE D’EVALUATION</b>	
<b>DE LA CAPACITE AEROPORTUAIRE .....</b>	<b>111</b>
VI.1 INTRODUCTION .....	111
VI.2 MODELISATION DU SYSTEME DE CIRCULATION .....	112
<i>VI.2.1 Les principales hypothèses du modèle .....</i>	<i>112</i>
<i>VI.2.2 Représentation des voies de circulation.....</i>	<i>112</i>
<i>VI.2.3 Représentation des flux de trafic .....</i>	<i>114</i>
VI.3 EVALUATION DE LA CAPACITE THEORIQUE .....	117

---

VI.4 EVALUATION DE LA CAPACITE OPERATIONNELLE.....	122
<i>VI.4.1 Evaluation des retards.....</i>	<i>123</i>
<i>VI.4.2 Formulation du problème d'optimisation de la circulation des flux.....</i>	<i>125</i>
<i>VI.4.3 Une approche d'évaluation de la capacité pratique .....</i>	<i>128</i>
<i>VI.4.4 Résultats numériques.....</i>	<i>133</i>
VI.5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....	136

---

## PARTIE 3

### LA GESTION DU TRAFIC AU SOL

---

<b>CHAPITRE VII – LES PROBLEMES DECISIONNELS POUR LA GESTION DU TRAFIC AU SOL.....</b>	<b>139</b>
VII.1 INTRODUCTION .....	139
VII.2 ANALYSE DE LA FONCTION DE GESTION DU TRAFIC AVION AU SOL .....	139
VII.3 LA GESTION DES ARRIVEES (PROBLEME G0).....	141
<i>VII.3.1 Cas d'une seule piste d'atterrissage .....</i>	<i>142</i>
<i>VII.3.2 Cas de plusieurs pistes d'atterrissage.....</i>	<i>143</i>
VII.4 LA GESTION DES POSTES DE STATIONNEMENT (PROBLEME G1) .....	147
<i>VII.4.1 Approche par la programmation mathématique.....</i>	<i>148</i>
<i>VII.4.2 Approches par les systèmes à base de règles.....</i>	<i>151</i>
VII.5 LE CHOIX DES CHEMINEMENTS (PROBLEME G2 ET G5) .....	153
<i>VII.5.1 Choix indépendant des cheminements .....</i>	<i>154</i>
<i>VII.5.2 Choix coordonné de cheminements.....</i>	<i>156</i>
VII.6 CONCLUSION .....	158
<b>CHAPITRE VIII – UNE APPROCHE ADAPTATIVE POUR LA GESTION DE MOUVEMENTS AU SOL DES AVIONS .....</b>	<b>159</b>
VIII.1 INTRODUCTION .....	159
VIII.2 APPROCHE DE RESOLUTION DIRECTE PAR LA PROGRAMMATION MATHEMATIQUE ...	159
<i>VIII.2.1 La modélisation retenue.....</i>	<i>159</i>
<i>VIII.2.2 Le problème d'optimisation proposé .....</i>	<i>160</i>

---

---

<i>VIII.2.3 Résultats et analyse.....</i>	<i>162</i>
VIII.3 QUELQUES ELEMENTS DE REFLEXION .....	163
VIII.4 UNE NOUVELLE APPROCHE POUR LA GESTION DES MOUVEMENTS AU SOL DES AVIONS .....	165
<i>VIII.4.1 Sélection des routes possibles.....</i>	<i>165</i>
<i>VIII.4.2 Evaluation des coûts associés aux différentes routes .....</i>	<i>169</i>
<i>VIII.4.3 Approche opérationnelle de résolution du problème et définition des itinéraires .....</i>	<i>175</i>
<i>VIII.4.4 Résultats numériques .....</i>	<i>178</i>
VIII.5 CONCLUSION .....	181

---

## CONCLUSION GENERALE

## ANNEXES

---

<b>A – UN ALGORITHME POLYNOMIAL POUR LES PROBLEME DE FLOT A COUT MINIMUM AVEC DES COUTS QUADRATIQUES [MINOUX, 1984] .....</b>	<b>189</b>
<b>B – AIRPORT GROUND MOUVEMENT SIMULATOR (AGMS) : UN OUTIL POUR LA SIMULATION DES MOUVEMENTS DES AVIONS AU SOL.....</b>	<b>194</b>
INTRODUCTION.....	194
GENERALITES SUR LE PROGRAMME .....	194
APPLICATION A L’AEROPORT DE DAKAR .....	200
CONCLUSION .....	206
 <b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	 <b>207</b>



## **Introduction Générale**



Le transport aérien joue un rôle majeur dans le développement économique globalisé que connaît actuellement le monde.

Au cours des prochaines décennies, le trafic aérien mondial, s'il accompagne la tendance actuelle pourrait doubler. Les structures actuelles d'opération et de contrôle du trafic aérien ne sont pas en mesure de faire face à cette croissance. Les limites de capacité, aussi bien pour les flux de trafic aérien que pour les activités aéroportuaires, sont déjà presque atteintes en Europe, aux Etats-Unis et au Japon.

De nombreux aéroports dans le monde sont au bord de la saturation et le moindre incident peut se traduire par une situation chaotique fortement pénalisante pour tous les acteurs du transport aérien.

L'aéroport de Paris Roissy – Charles de Gaulle est un bon exemple de plate-forme fonctionnant à la limite de sa capacité. Depuis sa création en 1974 jusqu'à aujourd'hui le trafic y a été multiplié par 13 et la croissance y est actuellement estimée à 5% par an.

Cette saturation à venir, si elle n'est pas évitée, aura d'importants impacts sur la sécurité, l'efficacité, la ponctualité et la fluidité des opérations de transport aérien et aura donc des conséquences économiques notables.

Les autorités ont déjà initié, depuis plus d'une décennie, des programmes d'études et de recherche pour améliorer les conditions d'écoulement des flux de trafic. Les thèmes abordés en premier lieu ont concerné le trafic aérien : la navigation par satellite, la réduction des séparations, les communications par lien de données (data-link) qui ont eu pour ambition d'augmenter sensiblement la capacité du système de contrôle du trafic aérien.

Depuis plusieurs années, les autorités s'intéressent de plus en plus aux problèmes liés à l'amélioration du trafic des avions au sol. En effet, celui-ci est devenu l'un des principaux facteurs limitant la capacité des plate-formes aéroportuaires. On se rend compte aujourd'hui que l'accommodation des flux de trafic à venir ne sera possible que si l'on prend directement en compte le problème de l'amélioration sensible des conditions du trafic au sol. N'oublions pas que pour les compagnies aériennes et les passagers, le vol commence et se termine sur les voies de circulation de l'aéroport.

---

L'objectif principal de cette thèse vise à contribuer sur le plan méthodologique à l'amélioration des techniques de gestion du trafic des avions sur les plate-formes aéroportuaires aussi bien sur le moyen-long terme, que sur le court terme.

Ce mémoire est divisé en trois grandes parties :

- La première partie présente les éléments généraux concernant les plate-formes aéroportuaires et l'opération des flux de trafic des avions au sol. Elle permet de préciser la problématique abordée et de présenter les nouveaux concepts développés par les autorités du trafic aérien pour y faire face. Elle comprend trois chapitres :
  - Le chapitre I présente les objectifs généraux de gestion du trafic des avions au sol, en précise les acteurs et les systèmes actuellement développés à cet effet.
  - Le chapitre II apporte une description physique des infrastructures aéroportuaires interagissant avec le trafic des avions au sol.
  - Le chapitre III présente le cadre opérationnel actuel de la gestion du trafic des avions au sol.
- La deuxième partie aborde le problème de l'évaluation de la capacité aéroportuaire, elle se place donc au niveau du dimensionnement ou du re-dimensionnement des installations aéroportuaires. L'objectif ici est d'introduire dans cette analyse de capacité l'effet de l'organisation des voies de circulation et du trafic des avions au sol qui y circulent.
  - Ainsi, au chapitre IV la notion de capacité aéroportuaire est d'abord définie, le concept restrictif de capacité associé traditionnellement au système de pistes y est étendu à l'ensemble de la plate-forme aéroportuaire.
  - Le chapitre V présente un état de l'art sur l'ensemble des modèles d'évaluation de la capacité aéroportuaire (modèles analytiques, modèles de simulation et modèles d'optimisation). Les différents modèles sont évalués en fonction de différents critères et notamment les possibilités qu'ils offrent de tenir compte des conditions du trafic des avions au sol pour évaluer la capacité.
  - Le chapitre VI propose une approche d'optimisation qui permet non seulement d'évaluer la capacité théorique de la plate-forme aéroportuaire, mais aussi sa capacité pratique. A cet effet, une nouvelle modélisation macroscopique mais structurée des flux de trafic est proposée et associée à des techniques numériques d'optimisation de complexité acceptable.



- La troisième partie aborde l'ensemble des problèmes de gestion du trafic des avions au sol sur le court terme. L'objectif ici est de développer un système d'aide à la décision destiné à seconder les contrôleurs de trafic dans leurs activités de gestion.
  - Le chapitre VII, après avoir réalisé une analyse des différents problèmes de décision associés à la gestion du trafic des avions au sol, présente pour plusieurs de ces problèmes une analyse des approches de résolution proposées dans la littérature.
  - Le chapitre VIII permet alors de proposer une approche adaptative pour la gestion des itinéraires empruntés par les avions au sol, conférant au système d'aide à la décision en résultant, une grande réactivité aux conditions changeantes du trafic et de son environnement.

Finalement, la conclusion générale dresse un bilan de l'ensemble de l'étude réalisée et propose plusieurs perspectives de recherche.



## **Partie 1 – Éléments généraux et problématique**



# Chapitre I – Les objectifs généraux de gestion du trafic des avions au sol

## I.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est principalement de présenter la problématique abordée dans cette thèse et de préciser son environnement technique. Ainsi, les acteurs du trafic aéroportuaire avec leurs objectifs respectifs sont décrits. Les principales fonctions à mettre en œuvre sont analysées et les éléments constitutifs des systèmes avancés de gestion et contrôle du trafic au sol sont présentés. L'état d'avancement des études et des programmes de recherche dans ce domaine est aussi rapporté.

## I.2 Les acteurs du trafic aéroportuaire

Deux groupes d'acteurs principaux sont impliqués dans les opérations au sol :

- les autorités aéroportuaires et les contrôleurs du trafic sol, d'un côté,
- les compagnies aériennes et les pilotes, d'un autre côté.

Les uns sont responsables de la définition de l'offre de service (les autorités aéroportuaires) et de sa mise en œuvre (les contrôleurs), les autres sont responsables de la demande de service (les compagnies aériennes) et de sa mise en œuvre (les pilotes).

On laissera de côté ici d'autres intervenants tels que pompiers, police et autres prestataires de services sur la plate-forme aéroportuaire en considérant que des moyens de localisation particuliers sont mis en œuvre et que des règles strictes de priorité sont imposées pour la circulation des véhicules qui leur sont associés.

Le rôle des **autorités aéroportuaires** en ce qui concerne le trafic aéroportuaire est de veiller sur le long, le moyen et le court terme à l'adéquation des infrastructures au sol qui permettent la circulation des avions sur la plate-forme aéroportuaire. Ainsi une grande partie de leurs

activités concerne la planification de la capacité de la plate-forme aéroportuaire, d'autres sont dédiés aux activités d'extension ou de redéploiement et enfin d'autres sont dédiés à l'entretien des installations.

Le rôle des **contrôleurs** est de tirer au mieux profit de la capacité installée de circulation aéroportuaire pour gérer les flux de trafic en privilégiant la sécurité et, autant que possible, la ponctualité. Ce qui signifie qu'ils doivent être capables de :

- localiser tous les aéronefs et les véhicules en mouvement sur la plate-forme aéroportuaire,
- guider les aéronefs (au sein du réseau de circulation aéroportuaire entre les pistes et les points de stationnement),
- parer à tout problème survenant sur la plate-forme et associé au système de contrôle du trafic sol (des pannes du balisage jusqu'aux incursions de piste).

A part leurs activités commerciales (transport de passagers et fret aérien) les **compagnies aériennes** sont amenées à développer les destinations offertes à leurs clients et donc à mettre en service des appareils de types et de capacités adaptés aux caractéristiques des marchés visés. Ainsi, c'est le succès du Transport Aérien sur le moyen-long terme qui a amené à la multiplication des compagnies aériennes et à l'expansion de leurs flottes d'avions. Elles interviennent donc sur le moyen-long terme essentiellement pour fixer les paramètres de la demande de service de circulation au sol des aéronefs.

L'**équipage** est en charge directe du contrôle des mouvements de l'avion sur la plate-forme aéroportuaire. Lors de l'exécution des instructions reçues du système de contrôle de trafic, le rôle de l'équipage est, entre autres, de :

- communiquer avec le système de contrôle de trafic au sol (« la tour »),
- suivre les instructions des contrôleurs de trafic,
- se localiser précisément sur la plate-forme aéroportuaire,
- éviter toute collision avec d'autres aéronefs, véhicules et autres obstacles,
- éviter toute excursion piste ou taxiway quelles que soient les conditions météorologiques et de visibilité.

## I.3 Les besoins des utilisateurs

Les compagnies aériennes, principaux utilisateurs des services offerts par les systèmes de gestion du trafic au sol, cherchent à fournir à leurs clients, passagers et compagnies (fret aérien) un service de qualité caractérisé par :

- la sécurité des opérations. Rappelons ici les accidents de Milan le 08/09/2001 en Italie, Madrid le 07/12/1983 en Espagne, Cherry Point le 15/12/1983 aux Etats-Unis, Copenhague le 10/09/1981 au Danemark, Tenerife le 27/03/1977 aux Iles Canaries, Chicago le 20/12/1972 aux Etats-Unis pour citer les plus connus. Ces accidents sont parmi les plus importants de l'histoire de l'aviation commerciale.
- la ponctualité et l'absence ou la limitation des retards, or nombre de retards se produisent au niveau de la plate-forme aéroportuaire et sont tributaires des conditions de trafic sol et dans la TMA,
- le confort, notamment au niveau des terminaux passagers de l'aéroport en cherchant à minimiser les distances que les passagers auront à parcourir pour embarquer, débarquer et transiter d'un vol à une autre. Néanmoins, ce dernier point dépendra beaucoup de l'organisation physique de l'aéroport.

Au cours d'un vol un avion doit affronter le trafic sol aussi bien au niveau de l'aéroport de départ, que de l'aéroport d'arrivée. La circulation de l'avion au sol peut alors subir d'importants aléas dus aux conditions de saturation du trafic, aux incidents bloquant des voies de circulation, aux conditions météorologiques (pluie, neige, glace) et aux conditions de visibilité. Ceci se traduit alors par d'importants retards mal ressentis sur le plan commercial par les passagers.

Remarquons qu'ici les intérêts des passagers et des compagnies aériennes coïncident en grande partie puisque la satisfaction des objectifs cités ci-dessus aura normalement une influence favorable sur les coûts opérationnels de la compagnie aérienne.

Ainsi, les compagnies aériennes attendent d'un système de gestion du trafic sol qu'il :

- assure la sécurité de la circulation au sol ;
- assure la fluidité des flux de trafic au sol ;

- résolve au mieux les situations de conflit ;
- respecte au plus près la programmation première des vols ;
- facilite les manœuvres aux abords des postes de stationnement ;
- accélère les phases de taxi à l’atterrissage et au décollage ;
- minimise les temps d’attente moteurs éteints (aux postes de stationnement) ou en marche (entrées et sorties de pistes, voies de circulation, postes de stationnement).

Rappelons que l'objectif des autorités aéroportuaires est d’accommoder au mieux le trafic et de réduire au minimum les nuisances qui en découlent.

## **I.4 Les systèmes mis en œuvre**

Avec la création de l’OACI, les premiers groupes de travail abordant ce domaine ont très vite conclu qu’une gestion efficace des mouvements aéroportuaires passait par la création d’un véritable « système » de contrôle du trafic au sol mettant en relation les contrôleurs, les pilotes et les autres agents intervenant sur la plate-forme. Ce système, appelé alors SMGCS (Surface Movement Guidance and Control System) a fait l’objet des nombreuses études, notamment avec l’accroissement du trafic et l’extension des voies de circulation et des zones de stationnement sur les grands aéroports. Aujourd’hui ce type de système n’est implémenté formellement que partiellement sur quelques aéroports aux Etats-Unis alors que des études expérimentales ont été réalisées à Roissy, Heatrow et Frankfort.

Les principales fonctions associés à ce système sont :

*La fonction Surveillance*, qui doit permettre d’accompagner l’évolution du trafic au sol et d’évaluer la situation courante du trafic.

*La fonction Planning opérationnel* qui, prenant en compte la situation actuelle du trafic, génère un plan d’action à partir des conditions courantes de la demande (avions à l’arrivée ou au départ) et de l’offre (par exemple, les positions de parking disponibles, les créneaux de départs sur les pistes etc.) de circulation.



*La fonction Routage* qui, à partir du plan d'action, génère des consignes de guidage pour les pilotes qui devront les exécuter.

### **I.4.1 La fonction Surveillance**

Les deux tâches principales de la fonction surveillance sont de réaliser l'identification et la localisation de tous les objets présents sur la plate-forme aéroportuaire. Ces objets sont aussi bien mobiles (avions en mouvement sur les pistes, véhicules et avions évoluant sur les voies de circulation) que statiques (véhicules à l'arrêt, obstacles permanents ou temporaires) et sont susceptibles d'influer sur le trafic aéroportuaire.

La troisième tâche de la fonction surveillance est de réaliser l'évaluation de la situation du trafic en détectant les situations potentielles de conflit. Si de telles situations sont détectées, la fonction de planning opérationnel devra permettre de les éviter ou de les résoudre.

### **I.4.2 Le Planning opérationnel**

L'objectif de la fonction de planning opérationnel est la génération d'un plan d'acheminement des véhicules visant à la fluidité d'un trafic qui minimise les conflits et les retards. Plusieurs tâches doivent être réalisées pour accomplir cet objectif.

La tâche principale de la fonction planning est la génération de plans d'acheminement sur les voies de circulation minimisant les conflits pour les mobiles contrôlés. Ceci prend en compte la circulation des avions allant de la piste d'atterrissage jusqu'à leur point de stationnement, la circulation des avions allant de leur point de stationnement jusqu'à la piste de décollage et les véhicules de service allant d'un point à un autre sur la plate-forme aéroportuaire. Elle doit veiller à l'intégration des opérations de décollage et d'atterrissage au niveau des pistes et de l'espace aérien immédiat en tenant compte des restrictions d'atterrissage et de décollage (créneaux horaires, séparations, trajectoires d'approche et de décollage).

### **I.4.3 Le Routage**

Aujourd'hui, tous les véhicules se font signifier la route qu'ils doivent suivre sur la plateforme aéroportuaire. Le système de routage peut être réactif pour prendre en compte les perturbations du trafic sol. La fonction routage génère alors pas à pas, et dans ce cas on parlera de guidage, les consignes de guidage.

Ces trois fonctions sont menées simultanément et peuvent faire face à de forts aléas (météorologiques, panne avion ou équipement, mouvements sociaux etc.) dont les conséquences sur le trafic au sol sont aggravées lorsque le système opère au voisinage de sa capacité opérationnelle.

## **I.5 La normalisation**

Ce sont les soucis de maintenir la sécurité de la circulation au sol et d'augmenter la capacité face à une demande en constante croissance qui ont entraîné sans attendre, la naissance d'un concept nouveau qui a visé à améliorer tous les domaines concernés par les mouvements au sol sur un aéroport. On a donc introduit le concept de A-SMGCS. Au départ le « A » de A-SMGCS a voulu dire « Automatical », ce qui correspondait à l'idée d'un système futuriste capable de tout gérer et de tout surveiller de façon autonome sans intervention de l'opérateur humain. Le terme « Automatical » est vite apparu trop ambitieux sur le plan technique et trop conflictuel sur le plan social, et a été remplacé par le terme « Advanced » qui qualifie, sans en préciser le degré « d'automatisation », un système devant garantir des performances améliorées notamment en ce qui concerne la sécurité et la capacité dans des conditions difficiles de météorologie, de densité de trafic et d'opérations particulières, et ceci grâce à l'emploi des techniques modernes de traitement de l'information et à un haut niveau d'intégration des différentes fonctions. Durant les années 90, l'idée que l'on se faisait de l'A-SMGCS a évolué et certains de ses concepts se sont clarifiés. L'OACI, dans [OACI, 1997] a indiqué les grandes lignes et les définitions des fonctions de base d'un tel type de système : Surveillance, Routage, Guidage, Contrôle.

L'EUROCAE (The European Organisation of Civil Aviation Equipment) a identifié les systèmes modulaires à mettre en place en précisant les performances attendues pour chacun d'eux. EUROCONTROL a réfléchi sur les problèmes liés à la mise en œuvre de tels systèmes, la Communauté Européenne ayant lancé plusieurs études sur le sujet. Parallèlement à tout cela, les aéroports importants pressés par leurs besoins opérationnels ont continué à s'équiper de moyens de plus en plus sophistiqués.

Les acteurs principaux de la normalisation internationale ont été la branche Europe de l'OACI avec le groupe AOPG PT/2 (Aérodrome Opération Group Project Team 2) dont les travaux entre 1986 et 2001 ont été repris par le groupe AWOP (All Weather Operation Panel) et le groupe 41 de l'EUROCAE (depuis 2001). EUROCONTROL s'est aussi intéressé à celui-ci et l'a intégré dans le concept « gate to gate » [THEATRE, 2002]. EUROCONTROL a aussi travaillé sur la normalisation des protocoles de communication utilisés dans le cadre de l'A-SMGCS. On peut citer par exemple [Vallée, 2001]:

- ASTERIX 10, pour une information mono capteur,
- ASTERIX 11, pour la sortie fusionnée de plusieurs capteurs.

En 1995 l'AOPG a produit un manuel Européen pour le A-SMGCS, document assez complet qui servit de base aux travaux de l'AWOP. Du document amendé et complété par l'AWOP, seule la première partie qui précise les objectifs de l'A-SMGCS, qui en décrit les fonctions de base et qui propose une méthode de classification des aéroports, a été approuvée par l'OACI en 1997. Depuis cette date l'AOPG poursuit des travaux visant à la définition d'un manuel A-SMGCS pour 2005. La prochaine étape devrait être la constitution d'un groupe de travail au niveau mondial, équivalent de l'AWOP, pour continuer ces travaux afin d'obtenir un document normalisé acceptable pour l'OACI.

## **I.6 Eléments sur les systèmes avancés de gestion et contrôle du trafic au sol (A-SMGCS)**

### **I.6.1 Leurs objectifs**

Les objectifs de ces systèmes sont bien sûr d'offrir les meilleures possibilités de capacité avec un très haut niveau de sécurité dans toutes les conditions mais aussi précisément :

- d'offrir à tous les acteurs (pilotes, contrôleurs, conducteurs de véhicule) un même niveau de service
- de préciser très clairement les responsabilités de chacun
- d'élaborer des moyens améliorés à l'intention de ces acteurs pour qu'ils puissent avoir une meilleure prise en compte de la situation
- d'améliorer les indications au sol et les procédures
- de réduire la charge de travail du contrôleur et du pilote par l'automatisation de certaines fonctions et l'amélioration de l'ergonomie
- d'offrir des solutions modulaires adaptées à chaque type d'aérodrome
- d'assurer la détection, l'analyse et la résolution des conflits
- de garantir un environnement plus sûr et efficace par l'automatisation en pouvant y inclure des éléments de contrôle, de guidage et d'assignation de routes.

### **I.6.2 Les principales fonctions du A-SMGCS**

Comme on l'a déjà dit, les quatre fonctions de base du A-SMGCS sont la surveillance, le routage, le guidage et le contrôle.

La fonction de *surveillance* est celle qui remplace la vision du contrôleur dans sa tour par beau temps et qui doit donner au système la connaissance de la position et de l'identification de tous les mobiles dans toutes les conditions météorologiques et toutes les configurations d'aérodrome. Cette connaissance de la situation par le système pourra être mise à la disposition des acteurs concernés (contrôleurs, pilotes, conducteurs de véhicules) mais sera aussi utilisée par les autres fonctions du A-SMGCS comme le guidage et le contrôle.

Selon l'OACI, la fonction de surveillance doit être capable de connaître la situation en temps réel avec la position et l'identification de tous les mobiles, ainsi que d'autres informations utiles pour la compréhension de la situation au sol (la vitesse ou la destination, par exemple). Le système doit être capable de renseigner les utilisateurs de cette situation, d'alimenter les autres fonctions du A-SMGCS et de détecter les intrusions de pistes.

On remarque ensuite, que pour atteindre un niveau de performance suffisant, il sera nécessaire d'utiliser plusieurs capteurs. En effet, le radar de surface le plus perfectionné ne peut fournir à lui tout seul toutes les informations nécessaires avec suffisamment de précision. Il y aura certainement plusieurs radars de surface complétés par d'autres capteurs pour enrichir la connaissance et/ou l'intégrité de la fonction. On conçoit dès lors, que le système devra disposer d'un module de fusion de données fournissant des informations aux autres fonctions du A-SMGCS.

La fonction de *routage* est celle qui va assigner une route à chaque mobile. En mode manuel cette route est proposée au contrôleur qui la transmet au mobile concerné. En mode automatique cette route est transmise directement au mobile, le contrôleur étant seulement informé mais ayant la possibilité d'intervenir. Pour bien fonctionner, la fonction de routage doit prendre en compte l'ensemble des données et des contraintes du problème et doit être capable de réagir en temps réel à tout changement pouvant survenir. La fonction de routage ne doit pas être une contrainte supplémentaire mais un moyen d'assistance permettant de réduire les temps de roulage et d'améliorer la fluidité du trafic au sol.

La fonction de routage doit prendre en compte le choix du pilote en ce qui concerne la sortie de piste, elle doit prévenir et limiter les conflits aux intersections, réagir aux modifications opérationnelles, et fournir un moyen de valider les routes proposées.

La fonction de *guidage* est celle qui va donner aux pilotes et conducteurs de véhicules des indications claires et précises leur permettant de suivre leur route. Lorsque les conditions de visibilité permettent un acheminement sûr, ordonné et rapide des mouvements autorisés, la fonction guidage sera essentiellement fondée sur les aides visuelles normalisées. Si les délais d'acheminement sont augmentés en raison d'une mauvaise visibilité, d'autres équipements au sol ou embarqués seront nécessaires pour compléter les aides visuelles afin de maintenir la cadence d'écoulement du trafic et d'appuyer la fonction guidage.

La fonction de *contrôle* est celle qui vient assister le contrôleur ou s'y substituer dans son rôle d'organisateur et de garant de la sécurité. Elle doit être capable d'organiser l'ensemble du trafic, de maintenir les séparations nécessaires entre les mobiles et entre ceux-ci et les obstacles, de détecter toute forme de conflits et de les résoudre. Elle peut déclencher des alertes à moyen terme pouvant être résolues par une modification de planification ou à court terme en demandant une réaction immédiate des acteurs concernés. Ces alertes peuvent être d'abord soumises au contrôleur dans le cas du mode semi-automatique, ce qui rajoute un délai de réaction, ou bien transmises directement au mobile concerné dans le cas du mode automatique.

### **I.6.3 La classification des besoins d'automatisation de la gestion de trafic au sol**

L'OACI qui a considéré que les A-SMGCS doivent être modulaires et doivent pouvoir s'adapter à tous les aéroports, a proposé une classification des besoins en fonction des aéroports et des conditions d'exploitation. Les trois critères retenus sont :

#### **1. La visibilité :**

On distingue les conditions de visibilité suivantes :

Visibilité 1 : suffisante pour la vision du pilote et du contrôleur

Visibilité 2 : suffisante pour le pilote, mais insuffisante pour le contrôleur

Visibilité 3 : suffisante pour le pilote, mais insuffisante pour éviter les collisions à vue (visibilité horizontale inférieure à 400m et supérieure à 75m)

Visibilité 4 : insuffisante pour le guidage visuel (visibilité horizontale inférieure à 75m)

#### **2. La densité de trafic :**

La densité de trafic correspond à la moyenne des heures de pointe journalière, elle est considérée :

- *faible* s'il y a moins de 16 décollages ou atterrissages par piste ou moins de 20 mouvements sur l'aérodrome
- *moyenne* s'il y a de 16 à 25 décollages ou atterrissages par piste ou un total de 20 à 35 mouvements sur l'aérodrome

- *forte* s'il y a plus de 26 décollages ou atterrissages par piste ou supérieure à un total de 35 mouvements sur l'aérodrome

### 3. L'organisation aéroportuaire :

Celle-ci considère la disposition générale de l'aérodrome et sa complexité qui peut être :

- de base pour un aérodrome ayant une seule piste et une voie de circulation
- simple pour un aérodrome ayant une seule piste et plusieurs voies de circulation
- complexe pour un aérodrome ayant plusieurs pistes

La combinaison de ces trois critères permet d'avoir une idée des besoins d'équipement en A-SMGCS mais il est difficile d'en tirer d'autres conclusions. A titre d'exemple, un aérodrome comme Toulouse-Blagnac se trouve pratiquement classé dans la même catégorie que Roissy (visibilité 3/densité forte/complexe), or il est clair que ces deux aéroports n'ont sûrement pas les mêmes besoins.

## I.6.4 Les éléments du système

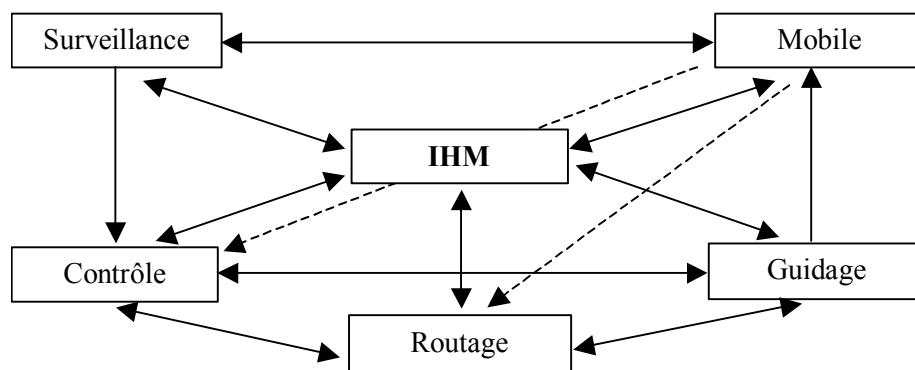


Figure I.1 Eléments fonctionnels généraux d'un système de type A-SMGCS

### Les Interfaces Homme Machine (IHM)

(IHM) dans le A-SMGCS assurent le lien entre le système et les utilisateurs, qui sont les contrôleurs, les pilotes et les conducteurs de véhicules. L'IMH du contrôleur doit lui permettre d'obtenir tous les renseignements nécessaires à son travail et doit évoluer en fonction du niveau d'automatisation du système. Aujourd'hui on sait ce que peut être une IHM représentative de la fonction de surveillance et de la fonction d'anti-collision, mais on

sait très mal définir les évolutions nécessaires pour assurer les fonctions de guidage et de routage. Cette IHM doit permettre d'améliorer les conditions de travail du contrôleur, doit lui permettre de gagner du temps et aussi d'appréhender des situations qu'il n'aurait pas pu prendre en compte sans cette aide. Elle doit être interactive afin de permettre au contrôleur de chercher les renseignements qui lui sont nécessaires en temps réel.

L'IMH du pilote doit être intégrée dans les équipements de bord et ne sera sans doute pas très spécifique pour le segment sol. On peut cependant envisager que le pilote puisse avoir une représentation renseignée de la situation sol sur son écran de navigation avec les obstacles, les autres mobiles, les alertes et les consignes. Cette vision futuriste n'est pas encore une réalité opérationnelle, mais fait l'objet de nombreuses études. Il en est de même pour la vision du pilote qui pourrait être améliorée par des systèmes spécifiques comme des caméras, ayant une bien meilleure perception que l'œil, ou une représentation tête haute des paramètres de guidage, lui permettant de gagner du temps et d'être plus efficace.

L'IHM du conducteur de véhicule n'est pas limitée par la normalisation des équipements de bord mais plutôt par la place disponible dans le véhicule et le réel besoin opérationnel. Cette IHM peut être simplement une alarme à bord des véhicules lorsqu'ils pénètrent dans une zone particulière mais aussi un écran représentatif de la situation. D'une manière futuriste on peut imaginer des moyens de guidage automatique permettant de suivre un itinéraire particulier.

### **Les modules anticollisions**

Le spectre de la collision au sol est un des soucis principaux des responsables des aéroports et le développement de systèmes permettant d'éviter ou de prévenir ces collisions représente la priorité pour de nombreux pays dans le domaine de l'A-SMGCS. Seulement, il ne peut y avoir de bon système anticollision sans qu'il n'y ait au préalable un bon système de surveillance, le module anticollision utilisant des données de surveillance pour détecter les situations potentiellement dangereuses.

Les défauts du système de surveillance se traduiront alors par des fausses alarmes ou par des configurations dangereuses non détectées.

Ces modules peuvent générer deux types de messages : des informations à moyen terme qui avertissent d'une situation potentiellement dangereuse mais ne demandent pas d'action immédiate et des alarmes à court terme demandant des actions immédiates.

Ces modules peuvent concerner les zones de pistes pour éviter les intrusions, les zones de circulation ou les zones de stationnement. Actuellement des modules anti-intrusion de piste



commencent à bien fonctionner sur plusieurs aéroports. Les zones de pistes sont à la fois celles où la qualité de surveillance est la meilleure et celles où le risque est le plus important en raison de la vitesse des avions.

### **Les modules de routage et de guidage**

Ces modules futurs sont ceux qui permettront au système d'évoluer vers un système complet. Cela concernera les fonctions routage et guidage qui n'existent pas à l'heure actuelle mais aussi toute forme de fonction automatique ou de transmission de données vers les mobiles. Pour le guidage, des modules d'automatisation du balisage axial ont été testés sans grand succès pour l'instant. D'autres idées visent à transmettre aux avions les moyens de se guider de façon autonome sur la plate-forme. Pour le routage, on peut imaginer un système capable de proposer le meilleur cheminement à chaque mobile soit par l'intermédiaire du contrôleur, soit directement.

Tout ceci fait l'objet des nombreuses recherches mais reste encore futuriste.

## **I.6.5 Les difficultés de la mise en œuvre et l'impact opérationnel attendu**

Le A-SMGCS est un concept nouveau, les premières applications en sont au début de la mise en service et il n'y a pas de vrai retour d'expérience, il est donc difficile d'en tirer de véritable enseignement. Par exemple, il a été pratiquement impossible de définir les performances nécessaires pour telle ou telle fonction. Il faudra obtenir un retour d'expérience de systèmes opérationnels pour les valider.

L'évolution des procédures et de la réglementation reste une opération lourde. Les premières idées concrètes ont permis d'aborder l'usage des strips pour le contrôle au sol et l'usage des voies de circulation multiples en mauvaises conditions de visibilité. L'évolution du partage des responsabilités est aussi un sujet très délicat à aborder, notamment lorsqu'on évoque des fonctions d'assistance ou des fonctions automatiques intervenant dans la prise de décision.

L'utilisation de fonctions automatisées est un sujet de controverse car il est dit d'un côté que le contrôleur doit toujours rester dans la boucle de décision mais qu'il peut aussi être court-circuité pour gagner du temps ou pour limiter sa charge de travail. Tout cela n'est pas forcément contradictoire, mais délicat à mettre en application et les performances du système associé sont difficiles à définir.

Après une dizaine d'années d'existence de ce concept, il n'est pas inutile de s'interroger sur le véritable impact opérationnel de la mise en place des fonctions du A-SMGCS. Dès la mise en place des premiers éléments de surveillance, on constate une amélioration de la sécurité. Le contrôleur a une meilleure maîtrise de la situation et peut aider le pilote dans les circonstances difficiles. La fonction contrôle, avec la mise en place d'alertes anti-intrusions représente aussi un progrès important en matière de sécurité. Déjà, à l'heure actuelle il est reconnu que des accidents ont été évités grâce à cette fonction.

Par contre en matière de capacité et d'efficacité les progrès sont plus difficiles. Bien sûr pour un aéroport qui n'a aucun système de surveillance, l'introduction d'un premier moyen comme un radar sol va permettre de lever les restrictions de la réglementation, mais ensuite la capacité de l'aéroport va rapidement atteindre une autre limite qui est celle des capacités d'atterrissage liées à l'utilisation de l'ILS. Une fois cette limite atteinte, l'augmentation de la capacité ne peut être obtenue que par l'évolution des moyens d'atterrissage comme l'introduction du MLS. Ensuite, pour percevoir un impact en matière d'efficacité comme la réduction du temps de roulage, la limitation des temps d'attente, l'amélioration de la fluidité du trafic, il faut mettre en place un système déjà très évolué comprenant toutes les fonctions de l'A-SMGCS : surveillance, contrôle, routage et guidage.

Un autre facteur non négligeable qui vient perturber cette logique d'augmentation de la capacité à tout prix, c'est la question de l'environnement. Pour tout aéroport, il y a une limite dans les nuisances que les riverains sont prêts à accepter.

Concernant la surveillance, l'introduction et la généralisation de nouvelles techniques comme l'ADS-B, ainsi que le développement des moyens de transmission de données devraient permettre d'obtenir de très bonnes performances. Les mobiles qui pourraient bénéficier des mêmes informations de surveillance que le contrôleur et la connaissance de leur position permettra aux pilotes de mieux anticiper leurs mouvements et de prévenir les collisions.

Concernant la fonction contrôle, les modules d'alertes anti-intrusions de piste sont déjà une réalité. Ces modules d'alertes devraient voir leurs performances s'améliorer et leur usage s'étendre progressivement à l'ensemble du cheminement. Les moyens de transmission de données permettront de prévenir immédiatement le pilote d'une situation dangereuse.

Concernant les fonctions de routage et de guidage, leur implantation sera certainement beaucoup plus lente et progressive. Les moyens de guidage ne sont pas actuellement

clairement définis et l'utilisation de systèmes de balisage axial au devant de l'avion nécessiteront une infrastructure lourde et coûteuse qui ne peut être envisageable que sur un nouveau aéroport. L'avenir semble plutôt aller vers l'évolution des systèmes de bord qui permettraient au pilote de se guider sur la plate-forme.

Le A-SMGCS est au tout début de son existence et comporte encore beaucoup d'incertitudes. Pour vraiment pouvoir l'utiliser, il sera indispensable de faire évoluer la réglementation et amener les contrôleurs et les pilotes à modifier leurs habitudes et leurs conditions de travail. C'est un chemin long et difficile mais qui est aujourd'hui incontournable.

## **I.7 La situation actuelle**

La gestion du trafic au sol sur les aéroports a donc subi une évolution importante depuis le début des années 90. Sous la pression de leurs besoins opérationnels, les aéroports ont fait appel à des systèmes de plus en plus évolués. Au stade d'équipement actuel, il s'agit encore de fournir au contrôleur une image représentative de la situation au sol. Ce premier niveau est plus complexe qu'il n'y paraît au premier abord, et doit être réalisé de façon à s'intégrer au développement des systèmes de type A-SMGCS. Certaines questions restent critiques :

- la numérisation de la poursuite par radar de surface ;
- la fusion des données de localisation avec l'apparition de nouveaux moyens de localisation (ADS-B, Mode S) ;
- la présentation des données aux contrôleurs et les problèmes d'interfaçage ;
- le traitement des données et la génération de signaux d'alarme ;
- la communication numérique (datalink) entre avions, mobiles et tour de contrôle .

Le concept d'A-SMGCS devra être progressivement implanté dans la plupart des grands aéroports et conduire à l'automatisation de la gestion du trafic au sol avec plusieurs degrés d'assistance des contrôleurs, pilotes et conducteurs de véhicules.

Citons ici quelques études récentes réalisées dans le cadre européen :

Le projet TARMAC (Taxi And Ramp Management And Control) [Böhme, 1994] s'est concentré sur :

- la vérification des bénéfices apportés par le concept intégré d'A-SMGCS comme l'amélioration de l'efficacité et de la sûreté ;
- la détermination de paramètres clé validés en vue de la standardisation (ICAO, EUROCONTROL) ;
- la démonstration des solutions techniques ;
- le développement, l'essai et l'optimisation des éléments principaux de l'A-SMGCS ;
- la définition de solutions pour toutes les catégories d'aéroports.

Le projet TARMAC inclut des essais avec des contrôleurs et des pilotes dans une installation de recherche à l'aéroport de Brunswick et un simulateur d'Apron/Tour utilisant une base de données de l'aéroport de Köln/Bonn et de l'aéroport de Brunswick.

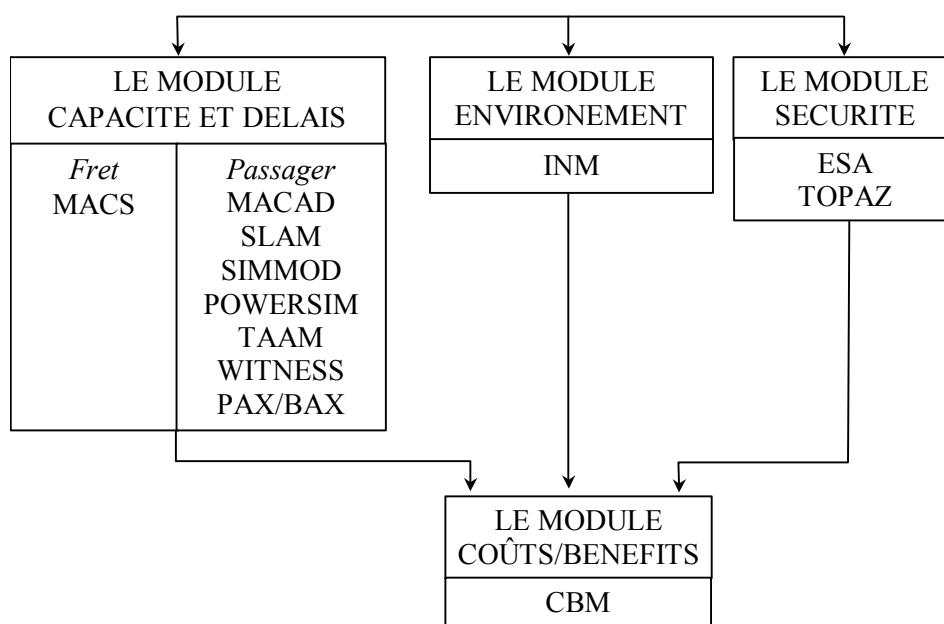
Le projet DEFAMM (DEvelopment of demonstration Facilities for Airport Movement guidance, control and Management) [DEFAMM] est un projet qui a été commandité par la Commission Européenne dans le 4<sup>ème</sup> programme-cadre avec la contribution d'industriels, d'organisations de recherche, d'aéroports et de fournisseurs de service de contrôle de trafic aérien. Le projet DEFAMM a visé à analyser les fonctions principales de gestion et de contrôle des mouvements sol dans un aéroport en utilisant des équipements dans un cadre opérationnel réel. L'évaluation qui a été réalisée a considéré les gains en sécurité et efficacité pour les compagnies aériennes et pour les autorités aéroportuaires. Les aéroports choisis pour la pré-démonstration de l'A-SMGCS ont été l'aéroport de Milan Bergamo, l'aéroport de Paris Orly et l'aéroport de Brunswick, puis de façon plus complète l'aéroport de Köln/Bonn.

Le projet BETA (Operational benefit evaluation by testing an A-SMGCS) [BETA] a eu comme objectifs :

- d'identifier les contraintes actuelles sur les voies de circulation, les pistes et les postes de stationnement sur l'efficacité et la capacité de l'aéroport une fois mis en œuvre l'A-SMGCS,
- de définir un concept opérationnel d'A-SMGCS en termes de modification des procédures afin d'éliminer ou de réduire ces contraintes,

- de démontrer les avantages opérationnels aussi bien sur le plan quantitatif que qualitatif pour les utilisateurs d'un tel système,
- de démontrer la réduction des impacts sur l'environnement qui peut être obtenue par un tel système,
- de fournir des données détaillées de performance des sous-systèmes/systèmes pour le manuel A-SMGCS de l'ICAO .

Un autre projet européen OPAL (Optimisation Platform for Airports including Landside) [OPAL] a développé une plate-forme de simulation permettant d'intégrer les principaux outils existants d'évaluation globale des performances opérationnelles d'un aéroport. Le projet s'est déroulé entre 2000 et 2002. Parmi les nombreuses fonctions et outils intégrés, OPAL contient un module d'évaluation et d'analyse de la capacité et des délais sur une plate-forme aéroportuaire.



**Figure I.2 Les éléments intégrant la plate-forme OPAL**

Les outils de simulation utilisés pour l'évaluation de la capacité sont soit analytiques (MACS, MACAD, SLAM), soit numériques (SIMMOD, TAAM, POWERSIM, WITNESS, PAX/BAX), voir figure I.2. L'idée principale a été d'intégrer plusieurs outils et modèles pour une représentation complète de l'opération d'une plate-forme aéroportuaire, ce qui en principe devrait permettre d'évaluer l'influence d'un système de type A-SMGCS sur les performances

de celle-ci. Néanmoins, cet ensemble qui reste très complexe à mettre en œuvre, permet difficilement d'évaluer des politiques de gestion du trafic des avions au sol.

## **I.8 Conclusion**

La gestion du trafic des avions au sol apparaît donc comme un problème extrêmement complexe où la difficile équation sécurité x efficacité doit être résolue aussi bien sur le long, le moyen et le court terme. Cette problématique met en jeu des multiples acteurs venant contraindre de façon complexe l'espace décisionnel des gestionnaires du trafic sol, ce qui semble se traduire par des structures complexes de gestion et de contrôle.



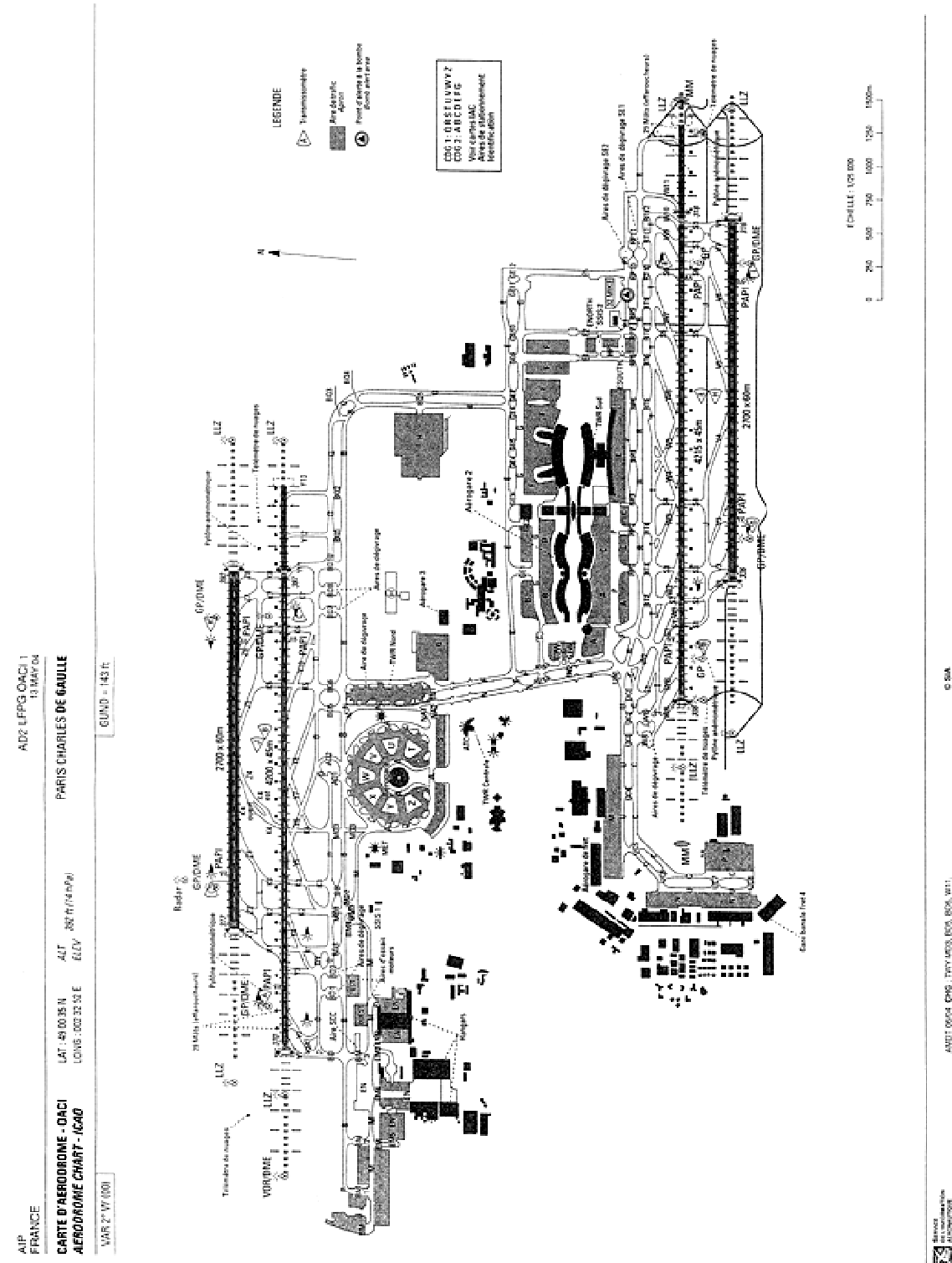
## **Chapitre II – L’organisation physique de l’aéroport et la circulation au sol**

### **II.1 Introduction**

L’objectif de ce chapitre est de décrire le cadre physique, dans toute sa diversité, au sein duquel évolue le trafic des avions au sol. Les principales composantes du système de circulation sont décrites, de même que leurs interconnexions. Différents exemples de configurations, de complexité variable, sont alors présentés.

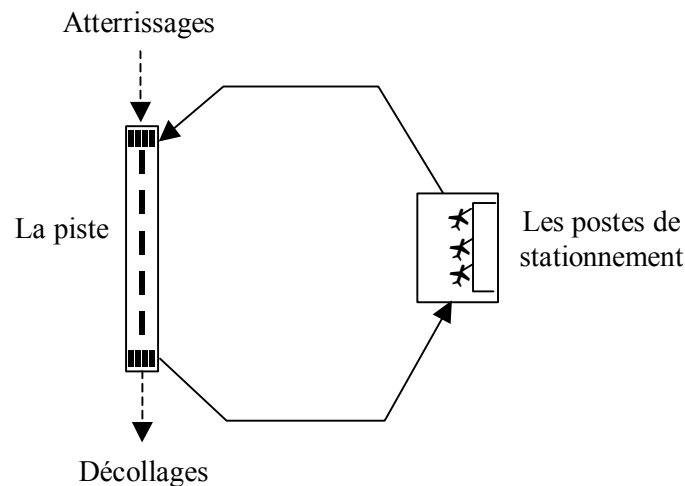
### **II.2 L’organisation générale d’une plate-forme aéroportuaire**

L’efficacité maximale d’un aéroport n’est obtenue qu’en réalisant un équilibre entre, d’une part, les aérogares de passagers et de fret, et d’autre part le système de pistes, le système de postes de stationnement et les zones d’entretien des avions. Ces éléments fonctionnels distincts sont reliés par le réseau de voies de circulation. Le réseau de voies de circulation constitue ainsi le support des échanges physiques entre les diverses sous systèmes de la plate-forme aéroportuaire et son fonctionnement efficace est essentiel à l’utilisation optimale de la plate-forme aéroportuaire. Un exemple en est l’aéroport parisien de Roissy – Charles de Gaulle (voir figure II.1) : deux terminaux de passagers, plus de 500.000 mouvements d’avions par an, avec quatre pistes, et deux tours de contrôle.





Le « côté air » de l'aéroport (le « airside ») peut être résumé par une grande boucle dont le nœud est constitué par les pistes et qui passe par les aires (les postes) de stationnement des avions (figure II.2). Il est clair que ce niveau de représentation est insuffisamment détaillé pour aborder l'analyse des problèmes opérationnels liés à la circulation des avions au sol, mais il met en avant le traitement cyclique réalisé par la plate-forme aéroportuaire sur le flux d'aéronefs l'utilisant.

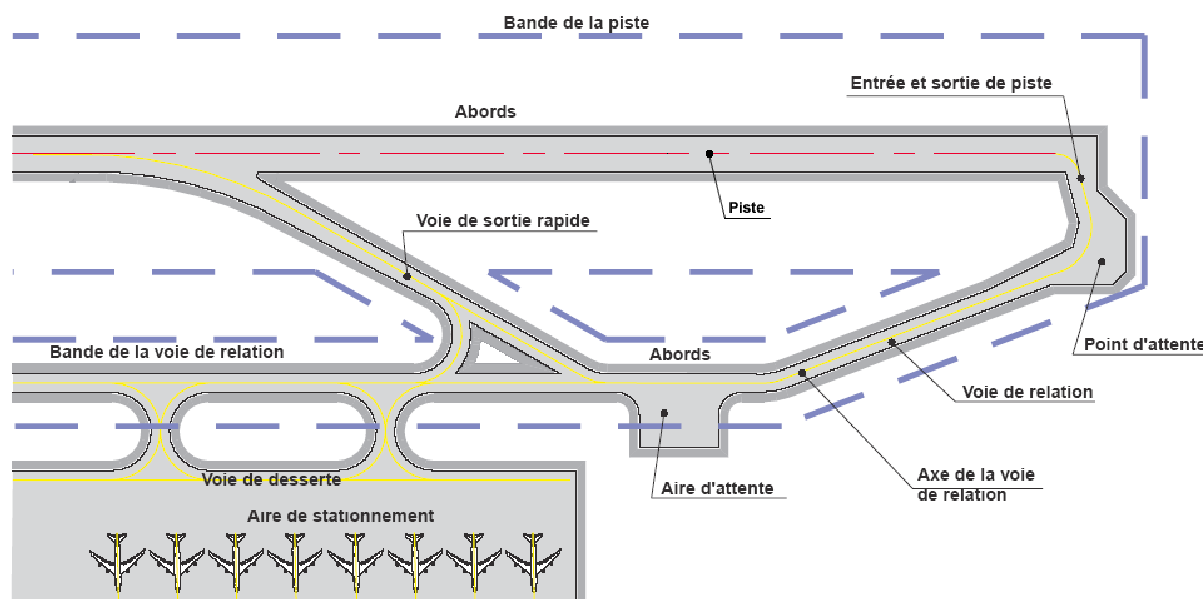


**Figure II.2 Représentation macroscopique globale des flux aéroportuaires**

Les mouvements au sol sont classés en trois grandes catégories : arrivées, départs et transferts d'un poste de stationnement à un autre.

Si sur le moyen terme (la journée) les deux premiers types de mouvements ont tendance à s'équilibrer en volume, le troisième type reste marginal sur beaucoup d'aéroports.

Au niveau organisationnel et opérationnel on peut identifier des zones de circulation distinctes (figure II.3) : les zones des pistes (« runways »), la zone des voies de circulation (« taxiways »), les zones des rampes associées à des zones de postes de stationnement (« apron » et « parking »). Chacune de ces zones comporte des règles spécifiques de fonctionnement et peuvent être sous la supervision directe de contrôleurs différents. Remarquons que sur un grand aéroport plusieurs zones de pistes et de postes de stationnement peuvent coexister avec en général des voies de circulation qui permettent d'assurer la connexion et l'accessibilité de celles-ci.



**Figure II.3 Les zones du système aéroportuaire**

Les pistes, par leurs dimensions, sont souvent les éléments les plus critiques lors de la définition ou de la redéfinition d'une plate forme aéroportuaire ; leur disposition influencera non seulement la position et les dimensions des différents terminaux, mais aussi la disposition et l'extension des voies de circulation. L'horizon de planification des plate-formes aéroportuaires porte sur plusieurs décennies et au fur et à mesure que le trafic augmente sur celles-ci, les possibilités de restructuration deviennent en général de plus en plus limitées compte tenu de l'espace disponible restreint et des contraintes d'accessibilité et d'environnement, chaque fois plus rigides compte tenu de la tendance générale à la densification de l'occupation des espaces au voisinage des aéroports.

Les principaux éléments constitutifs « côté air » de la plate-forme aéroportuaire sont : les aires de stationnement, les voies de circulation et les pistes.

## II.3 Les aires de stationnement

Les aires de stationnement sont les aires de la plate-forme aéroportuaire destinée à recevoir les avions pendant l'embarquement ou le débarquement des passagers, de la poste ou du fret, pendant le ravitaillement en carburant, le stationnement au repos et l'entretien. On peut distinguer plusieurs types d'aires de stationnement : les aires de stationnement destinées à

l'aérogare de passagers et au fret, à l'entretien, au garage, à l'aviation générale basée sur cette plate-forme et au stationnement temporaire des avions de passage.

Les aires de garage, destinées au stationnement des aéronefs en dehors des périodes d'escale, et les aires d'entretien, destinées aux opérations d'entretien et de réparation, ne sont jamais dans la pratique des facteurs limitatifs de la capacité d'un aéroport. Par contre, l'expérience montre que les aires de trafic passagers ou fret peuvent représenter un élément de saturation sur un aéroport. Les gestionnaires devront vérifier que le nombre de postes de stationnement et leur disposition est compatible avec les volumes et la nature (dimensions des aéronefs) du trafic attendu, notamment pendant les heures de pointe. Les limitations de capacité dues à l'insuffisance du nombre de postes conduisent souvent à l'utilisation de positions déportées inconfortables pour les passagers et pénalisantes pour les compagnies aériennes.

La circulation des aéronefs sur l'aire de manœuvre pour stationnement peut parfois être un facteur limitatif de la capacité des voies de circulation. Ce genre de problème se rencontre surtout sur des aéroports exigus et à fort trafic. Les évolutions des avions stationnés en « nose-in » peuvent entraver des mouvements d'autres aéronefs gagnant leur poste ou le quittant. De tels conflits en heures de pointe ont des répercussions immédiates. La simulation au cas par cas et pas à pas des mouvements de tous les appareils susceptibles d'utiliser cette zone de stationnement en heure de pointe peut permettre de valider simultanément la configuration de stationnement et les procédures opérationnelles de stationnement.

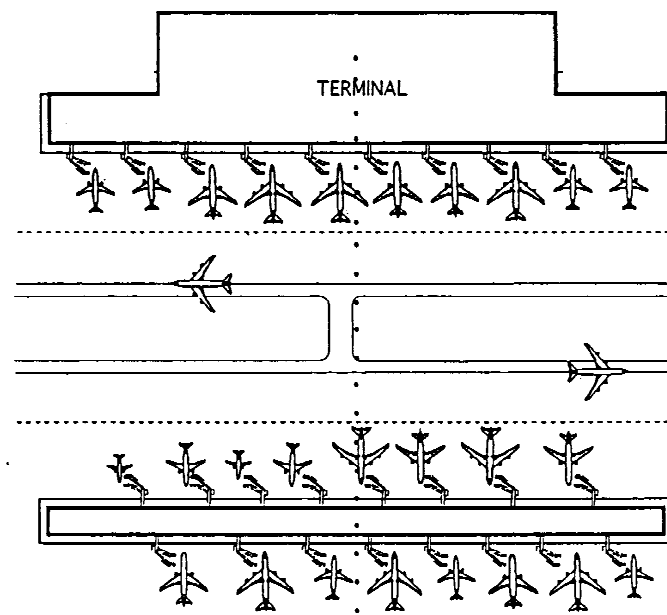
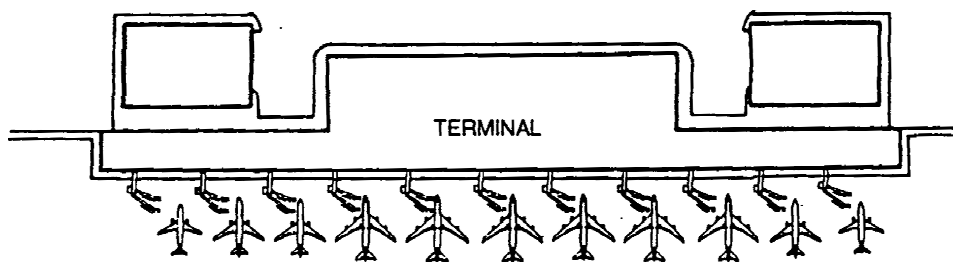
La configuration des zones de stationnement est étroitement reliée au concept utilisé pour les aérogares de passagers et de fret. La figure II.4 montre différents systèmes de stationnement.

On peut par exemple considérer des configurations telles que :

- Le système simple qui s'applique aux aéroports à faible volume de trafic, les avions y sont stationnés en oblique de manière à pouvoir entrer et sortir par leurs propres moyens, le problème du souffle moteur doit être néanmoins considéré.
- Le système linéaire qui peut être considéré comme une phase évoluée de la configuration simple.
- Le système à jetées dont il existe plusieurs variantes. Les avions peuvent stationner au niveau des postes. Dans le cas de plusieurs jetées il faut aménager un espace suffisant

pour éviter les conflits et pouvoir répondre aux exigences des avions de plus grandes dimensions.

- Le système à satellites qui comprend des unités satellites séparées de l'aérogare et entourées de postes de stationnement d'avions, l'accès passagers se fait par un passage souterrain ou surélevé. Cet type de conception se prête mal à des développements ultérieurs.
- Le système à transbordement, ou système déporté, est le plus convenable pour les opérations des avions, mais il faut transporter les équipages, les passagers, les bagages et le fret sur des distances qui peuvent être relativement longues ou sur des itinéraires encombrés et ceci peut donc conduire à des retards supplémentaires.
- Le système hybride qui représente une combinaison de deux ou plusieurs systèmes décrits ci-dessus, c'est la pratique la plus courante sur les grands aéroports.



Systèmes linéaires

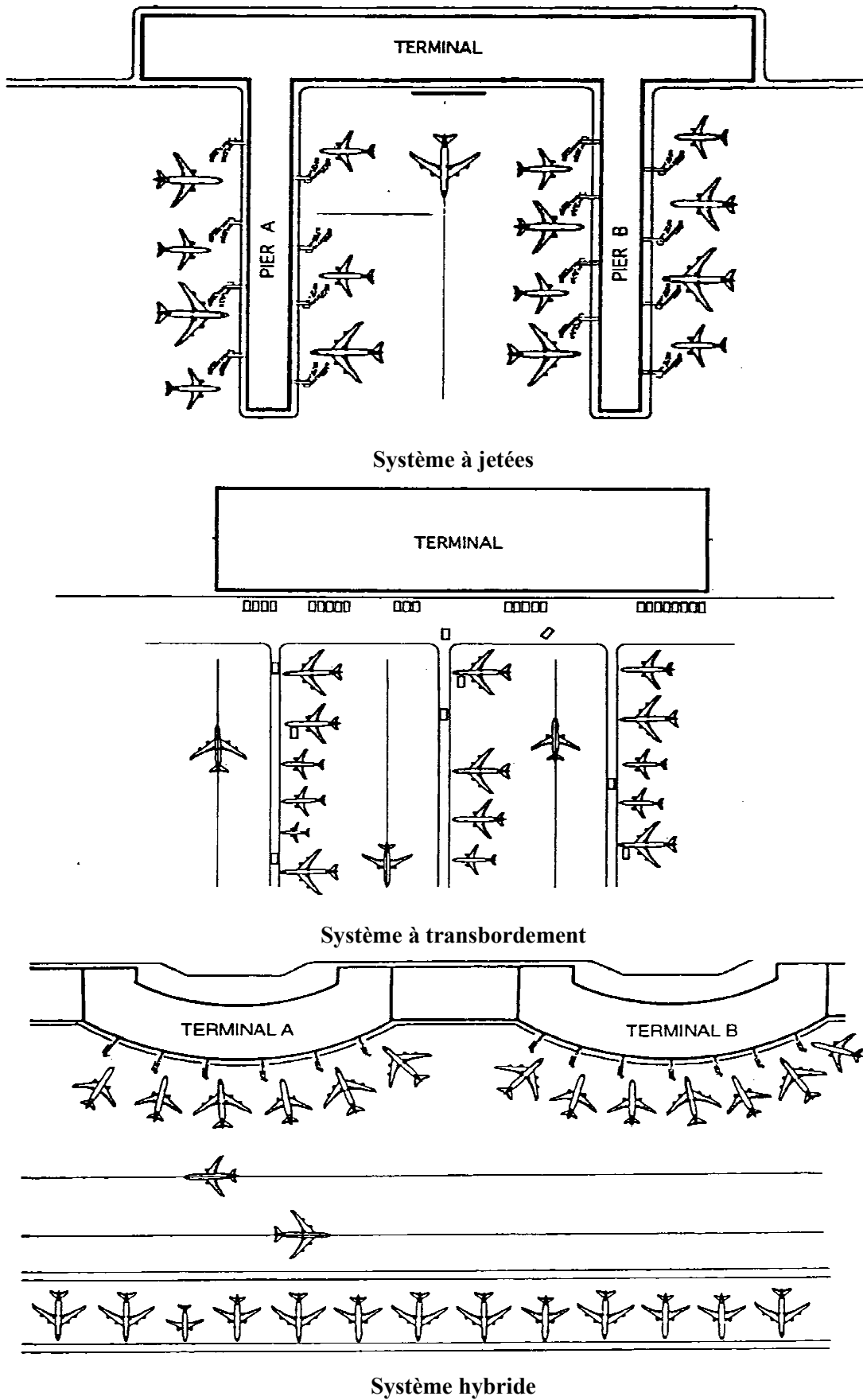


Figure II.4 Exemples de configurations de postes de stationnement avions

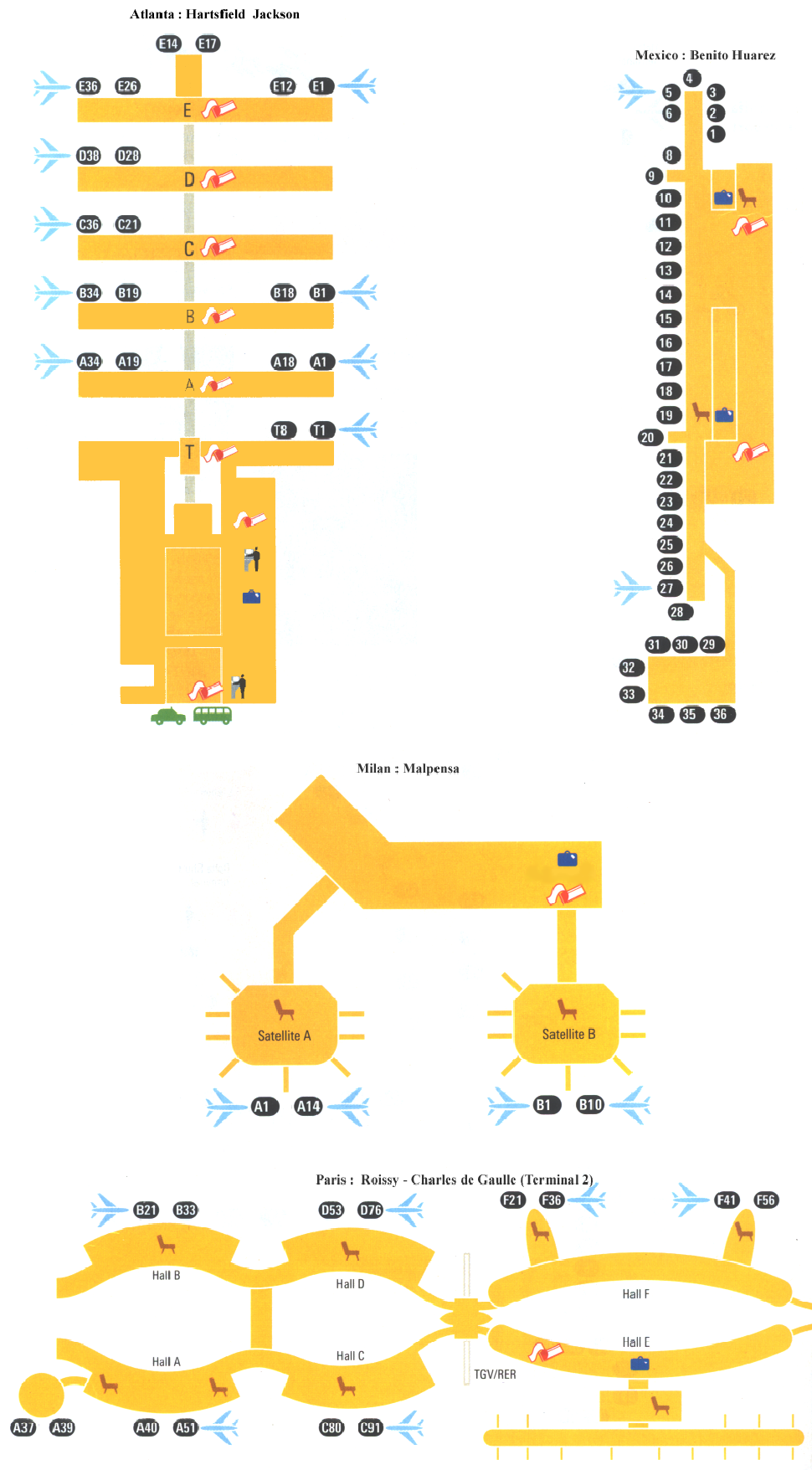


Figure II.5 Exemples réels de configuration de terminaux

## II.4 Les aires de trafic (aprons)

Les aires de trafic ou aprons sont les zones de raccordement entre les postes de stationnement et les voies de circulation, parfois comprises dans celles-ci. Sur certains aéroports, selon leur infrastructure, cette zone peut être absente. L'exemple typique d'utilisation d'aprons concerne les postes de stationnement avec un système à jetées. Cette zone ne permet pas la circulation de deux avions en sens opposé et des restrictions de circulation doivent être introduites. Ainsi en général, pour éviter les conflits, l'avion qui n'a pas la priorité doit attendre sur la voie de circulation et laisser passer l'avion prioritaire par la zone de trafic. La zone d'apron est un tampon entre les voies de circulation et les postes de stationnement. Au moment du repoussage des avions, l'existence d'un apron évite le blocage de la circulation sur les voies de circulation voisines.

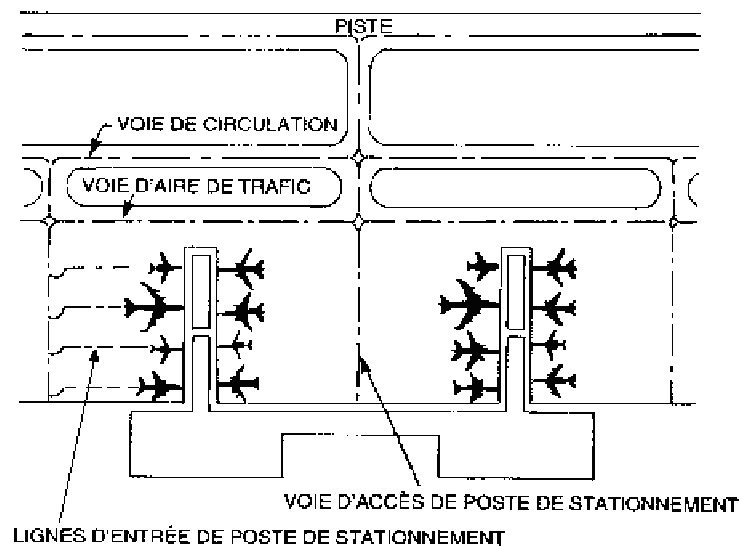


Figure II.6 Les zones d'apron ou aires de trafic

## II.5 Les voies de circulation

D'une façon générale, l'expérience montre que les voies de circulation peuvent devenir un élément critique pour la capacité d'un système aéroportuaire. Face à une forte demande de trafic, la carence de voies de circulation ou la complexité du réseau de voies de circulation peuvent conduire à cette situation :

- C'est le cas des aéroports à une seule piste ne possèdent pas de voie de circulation parallèle. On ne trouve alors souvent qu'une seule entrée-sortie. La voie de circulation qui relie la piste aux installations terminales est alors unique ; des blocages peuvent apparaître lorsqu'un décollage suit un atterrissage. Le retard induit est alors équivalent au temps de parcours de cette voie unique afin de la dégager.
- C'est le cas des aéroports à plusieurs pistes avec un réseau complexe de voies de circulation, entraînant des traversées des pistes et des croisements multiples de voies de circulation. Les traversées de piste sont effectuées soit par les appareils qui rejoignent leur piste de décollage soit par les appareils qui viennent d'atterrir. Au niveau des croisements de voies, des conflits apparaissent entre les avions à l'arrivée et au départ.

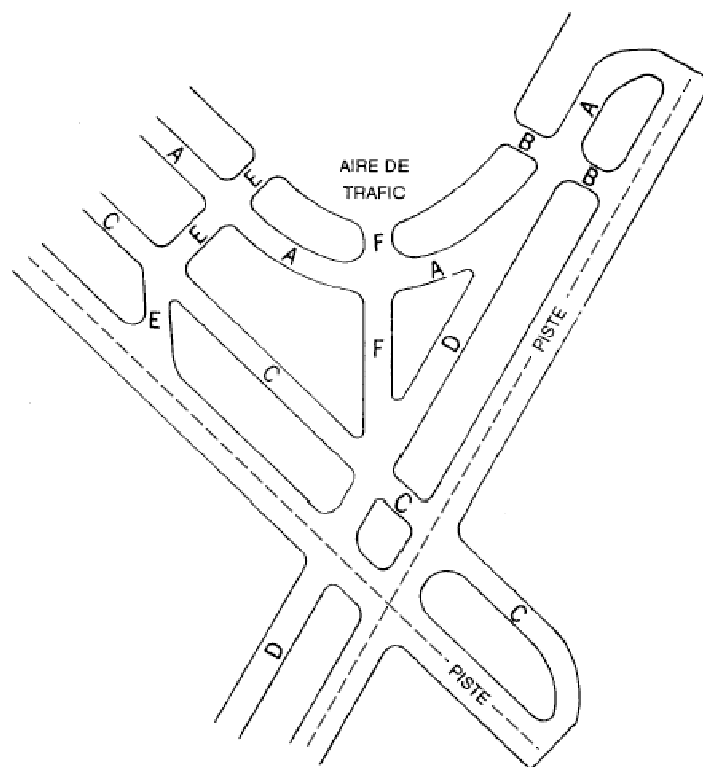
On peut énoncer quelques principes généraux de conception du réseau de voies de circulation :

- le système des voies de circulation reliant les divers éléments de la plate-forme doit être aussi court que possible, réduisant ainsi la durée de la circulation au sol et les coûts associés au roulage sur celles-ci,
- il doit être aussi simple que possible pour éviter aux contrôleurs du trafic au sol d'avoir à donner des instructions compliquées et pour simplifier la tâche des pilotes,
- il convient d'adopter autant que possible des tracés rectilignes afin de limiter les manœuvres délicates et à basse vitesse des avions,
- les intersections de pistes et de voies de circulation doivent être évitées dans la mesure du possible dans l'intérêt de la sécurité et pour réduire la possibilité des retards sur les voies de circulation (conflits, formation des files d'attente),
- les itinéraires des voies de circulation devraient comporter le plus grand nombre possible de segments à sens unique afin de réduire les conflits avec d'autres avions et les retards correspondants. Il convient d'analyser les écoulements sur les divers segments pour chaque configuration dans laquelle la ou les pistes seront utilisées.

Pour limiter les niveaux d'investissement mis en œuvre, les réseaux de voies de circulation d'un aéroport présentent souvent un niveau de développement adapté à la capacité requise à court terme. Une bonne conception de l'ensemble doit alors permettre d'introduire



progressivement des éléments additionnels à mesure que la demande augmente. Un exemple d'un système des voies de circulation au sol est présenté en figure II.7.



**Figure II.7 Réseau de voies de circulation**

Les voies de circulation sont strictement signalisées, la réglementation internationale obligeant les autorités aéroportuaires à signaler et marquer les voies de circulation. Les moyens de signalisation sont très divers : panneaux lumineux, panneaux réfléchissants, balises lumineuses, barres d'arrêts, éclairages et autres systèmes mobiles. Le marquage est fait avec de la peinture réfléchissante, il peut être axial ou transversal.

## II.6 Les pistes

Le système de pistes est la composante majeure d'un aéroport. Les pistes sont une ressource importante et leur planification doit tenir compte de la direction des vents, de l'estimation de la demande de trafic, de l'implantation actuelle et future, des riverains, des conditions géologiques etc.

Le système de pistes et de voies de circulation doivent être intégrés de façon à :

- faciliter la mise en œuvre de la capacité maximum du système des pistes,
- offrir un cadre pour une gestion fluide et sans congestion du trafic sol,
- présenter des chemins directs conduisant aux autres sous systèmes de l'aéroport,
- faciliter le dégagement de la piste à l'atterrissage,
- éviter d'avoir des voies de circulation qui croissent les pistes actives.

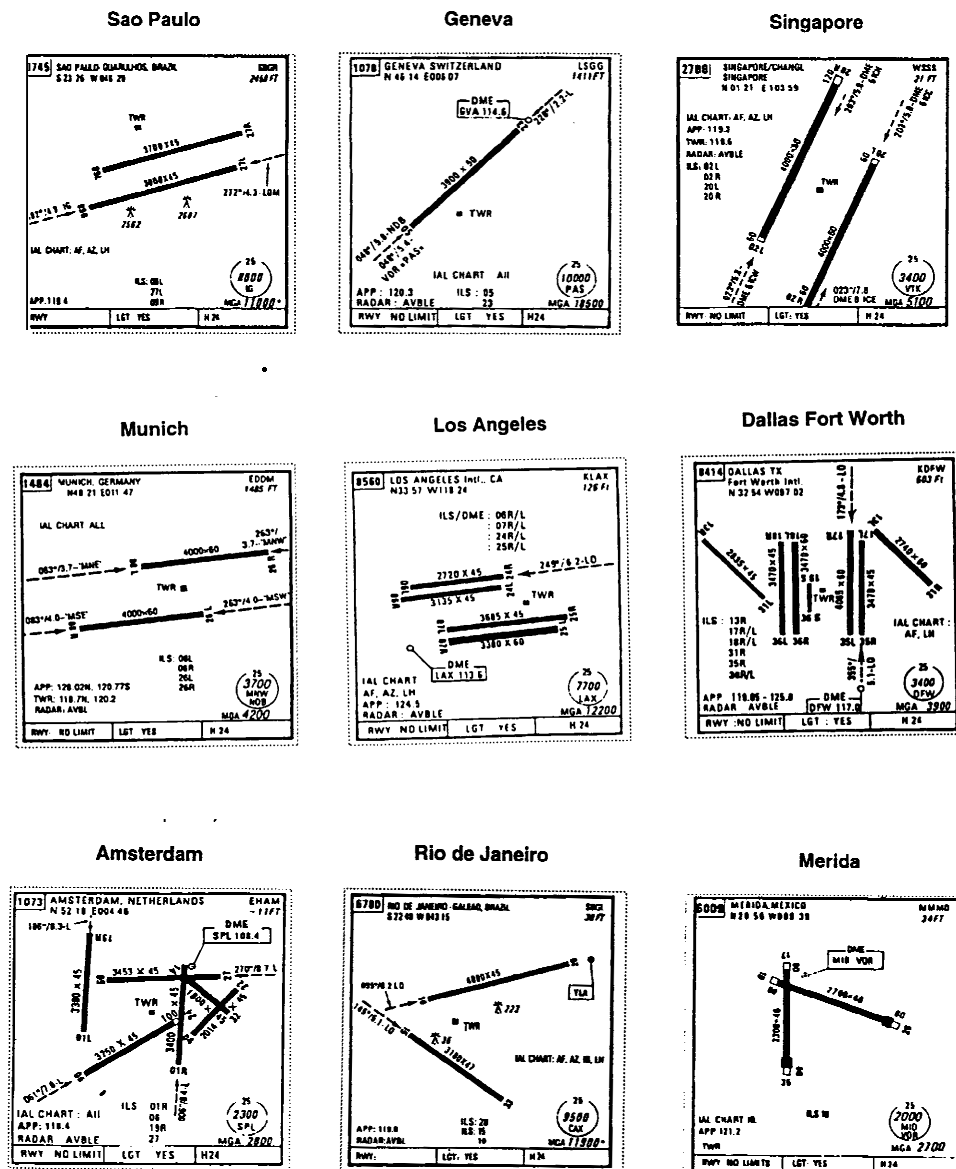
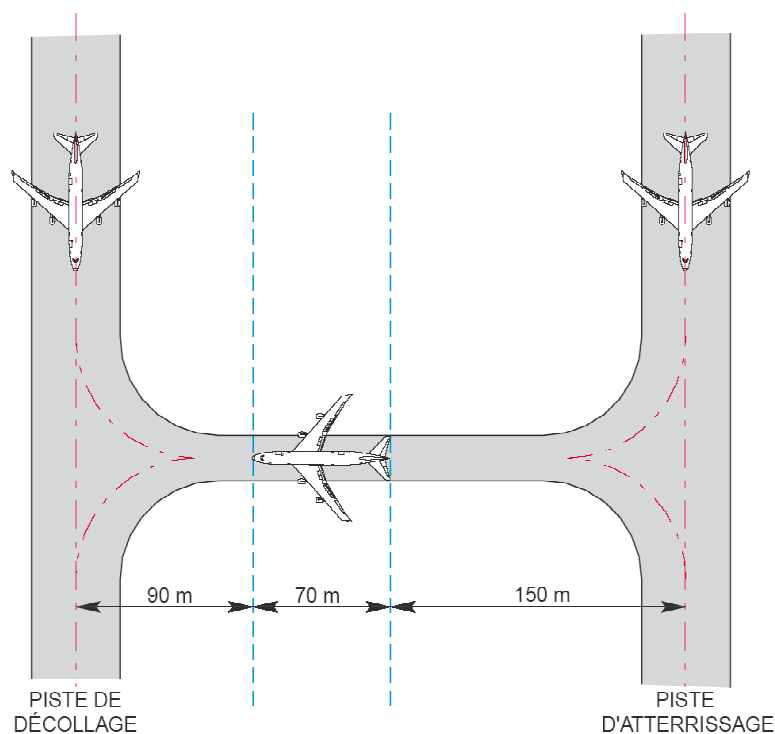


Figure II.8 Exemples réels de configurations de systèmes de pistes d'aéroports exploitant une, deux ou plusieurs pistes sécantes

## II.7 Les sorties de pistes et les aires de stockage

Les sorties de piste sont des aménagements pour les arrivées de sorte que les avions puissent dégager la piste en toute sécurité et le plus rapidement possible. Les sorties de piste peuvent être classées selon la vitesse à laquelle les avions les empruntent : sorties normales et sorties rapides.



**Figure II.9 Exemple de distances de sécurité aux abords de la piste**

Une voie de sortie rapide est une voie de circulation raccordée à une piste suivant un angle aigu et conçue de façon à permettre à un avion qui atterrit de dégager la piste à une vitesse plus élevée que celle permise par les autres voies de sortie, ce qui réduit la durée d'occupation de la piste. Les vitesses pratiquées sur une sortie rapide varient entre 35 nœuds (65 km/h) et 50 nœuds (93 km/h). Pour des raisons économiques sur les aéroports ayant une demande de trafic de moins de 25 mouvements par heure, les sorties droites sont souvent utilisées alors que les sorties rapides peuvent être absentes.

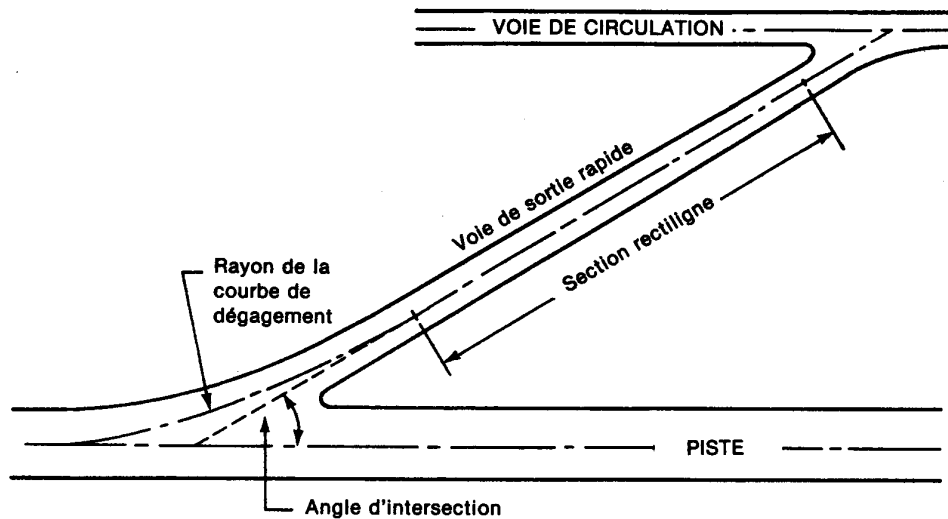


Figure II.10 Voie de sortie rapide

La présence d'aires de stockage au voisinage des extrémités des pistes est importante pour la politique d'ordonnancement des départs. La mise en place d'un nombre adéquat de plateformes d'attente ou d'autres dérivations, fondée sur une analyse de la demande horaire de départs d'avions actuelle et à court terme, permet un large degré de souplesse dans l'établissement de la séquence des départs. Cela donne alors aux contrôleurs de trafic aéroportuaire une plus grande latitude pour ajuster la séquence de décollage à celle des atterrissages, pour éviter des attentes inutiles et augmenter ainsi la capacité de l'aéroport.

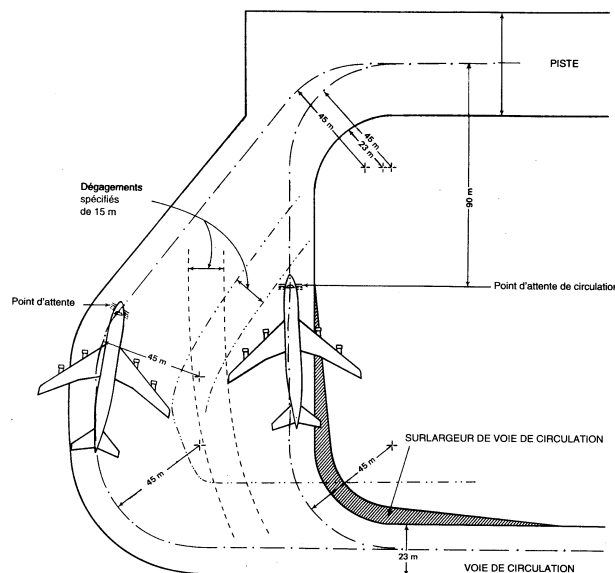


Figure II.11 Exemple détaillé d'une aire de stockage

Les plate-formes d'attente et autres déviations permettent :

- de retarder le départ de certains avions en raison de circonstances imprévues, sans retarder les avions qui suivent (par exemple le remplacement d'un équipement défectueux) ;
- d'effectuer des dépassement contrôlés entre avions ;
- aux équipages de procéder à la vérification, au réglage et à la programmation des équipements de bord lorsque ces opérations ne sont pas possibles sur l'aire de trafic ;
- faire un point fixe, dans le cas des avions à moteurs à piston ;
- d'établir un point de vérification VOR de l'aéroport.

## II.8 Conclusion

Si sur le plan macroscopique, la plate-forme aéroportuaire peut être appréhendée comme un serveur traitant des flux d'avions à l'arrivée pour les réinjecter dans le trafic aérien la reliant aux autres plate-formes aéroportuaires, si l'on augmente le degré de l'analyse, on s'aperçoit très vite de la diversité des situations et des configurations existantes, associées à des degrés de complexité très variables dans la structure du trafic au sol. Devant tant de diversité, on mesure la difficulté à développer des concepts généraux de gestion de trafic sol, applicables dans toutes ces situations.





# **Chapitre III – Le cadre opérationnel du trafic sol**

## **III.1 Introduction**

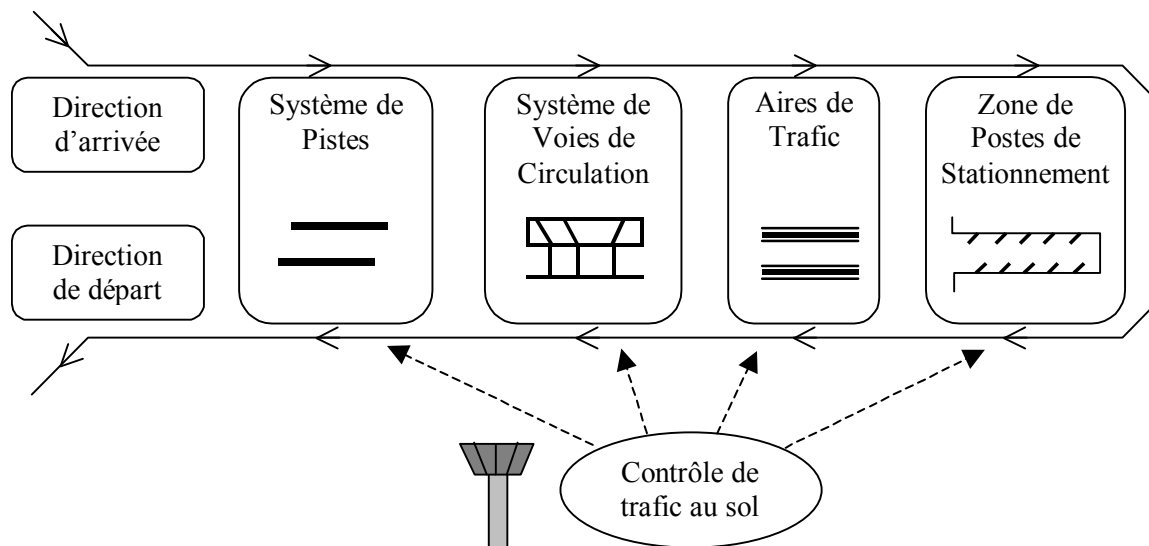
Dans ce chapitre, le cadre opérationnel du trafic des avions au sol est précisé : il s'agit bien de véhicules qui doivent être précisément localisés et guidés sur un réseau de voies de circulation, ce qui met en jeu des systèmes de signalisation, de localisation et de communication. Les conditions opérationnelles vont alors dépendre de facteurs tels que les caractéristiques des aéronefs face à la géométrie des voies de circulation, mais aussi et pour beaucoup, des conditions météorologiques et notamment de la visibilité.

## **III.2 Considérations générales**

L'accroissement considérable du trafic aérien dans tous les grands aéroports du monde a entraîné une augmentation sensible, sur les pistes, les voies de circulation et les aires de stationnement, des mouvements d'avions mais aussi de véhicules divers. Aussi s'est-il avéré de plus en plus nécessaire de mettre à la disposition des contrôleurs des systèmes donnant une image constamment mise à jour de l'ensemble de la situation qui règne sur les aéroports (radars de surveillance, détecteurs et senseurs, systèmes de positionnement par satellite embarqués etc.).

Jusqu'à récemment, la sécurité des mouvements au sol a été assurée par le principe simple « voir et être vu » dans le respect de la réglementation OACI [OACI, 1986] du SMGCS. Les procédures opérationnelles dépendent de la vision directe du contrôleur et du pilote. Le contrôleur dans sa tour doit voir la situation globale et détecter les anomalies. Le pilote ou le conducteur de véhicule voient la situation devant eux et assurent leur sécurité immédiate. Lorsque les conditions de visibilité se dégradent, ce principe devient de plus en plus dur à respecter et des mesures doivent être prises pour maintenir la sécurité. Le pilote localise sa position sur le terrain et la transmet par VHF au contrôleur. En l'absence de radar de surface, la circulation des véhicules est strictement réglementée voire interdite, le mouvement des

avions est limité à un seul par zone et une seule bretelle de sortie est activée. Lorsqu'un radar de surface est installé, l'information présentée au contrôleur lui permet de suivre les évolutions des avions, de vérifier que les pistes sont bien dégagées avant tout mouvement d'atterrissage ou de décollage, et de fournir aux pilotes des informations liées à la sécurité de l'avion.



**Figure III.1 Les flux de trafic et la structure de contrôle d'un aéroport**

La circulation des aéronefs au sol s'intègre à celle des très nombreux véhicules de servitude, à celle des véhicules de secours ainsi qu'à celle des aéronefs, remorqués ou non, en provenance ou à destination des aires d'entretien. La circulation au sol des aéronefs conditionne pour une grande part la capacité des aéroports ainsi que l'encombrement des espaces aériens environnants. Elle a un impact important sur la sécurité, la qualité de service et l'économie des opérations de transport aérien.

### III.3 Les systèmes de signalisation

Sur la plate-forme aéroportuaire, le pilote dispose d'aides à l'orientation visuelles :

- marques de piste et de voie de circulation qui consistent en marques axiales et latérales ; les marques axiales sont indispensables pour maintenir le cap ; elles permettent au pilote de suivre une ligne qui le guide dans la direction du mouvement.



- signaux de destination ; les signaux de guidage (signaux d'emplacement et de destination) consistent, dans la grande majorité de cas, en panneaux indicateurs verticaux placés à la proximité des pistes et des voies de circulation ; la nuit, ces panneaux sont illuminés ou seulement réfléchissants.
- indicateurs d'alignement et d'arrêt sur les aires de stationnement ; l'indication de l'emplacement du poste de stationnement affecté à l'avion, la précision des évolutions d'approche et de l'arrêt au point de stationnement sont assurés par des systèmes optiques lumineux ou des marques peintes sur le sol.

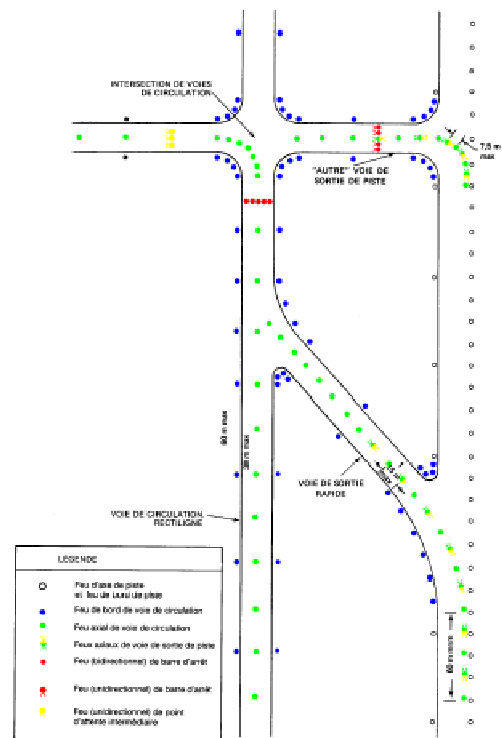


Figure III.2 Le balisage lumineux des voies de circulation et des pistes

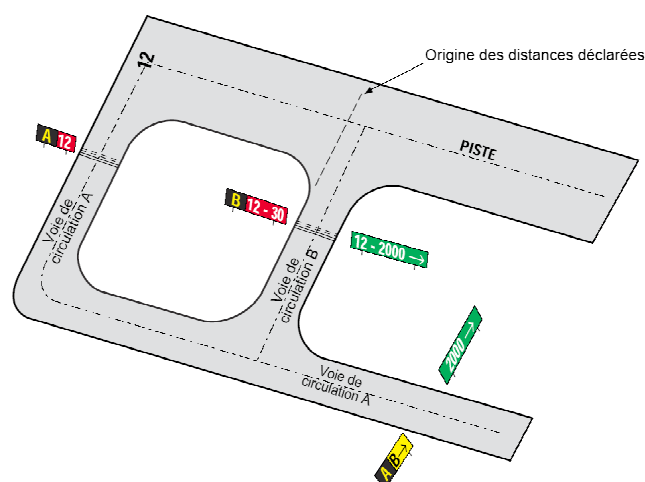


Figure III.3 Marquage des voies de circulation

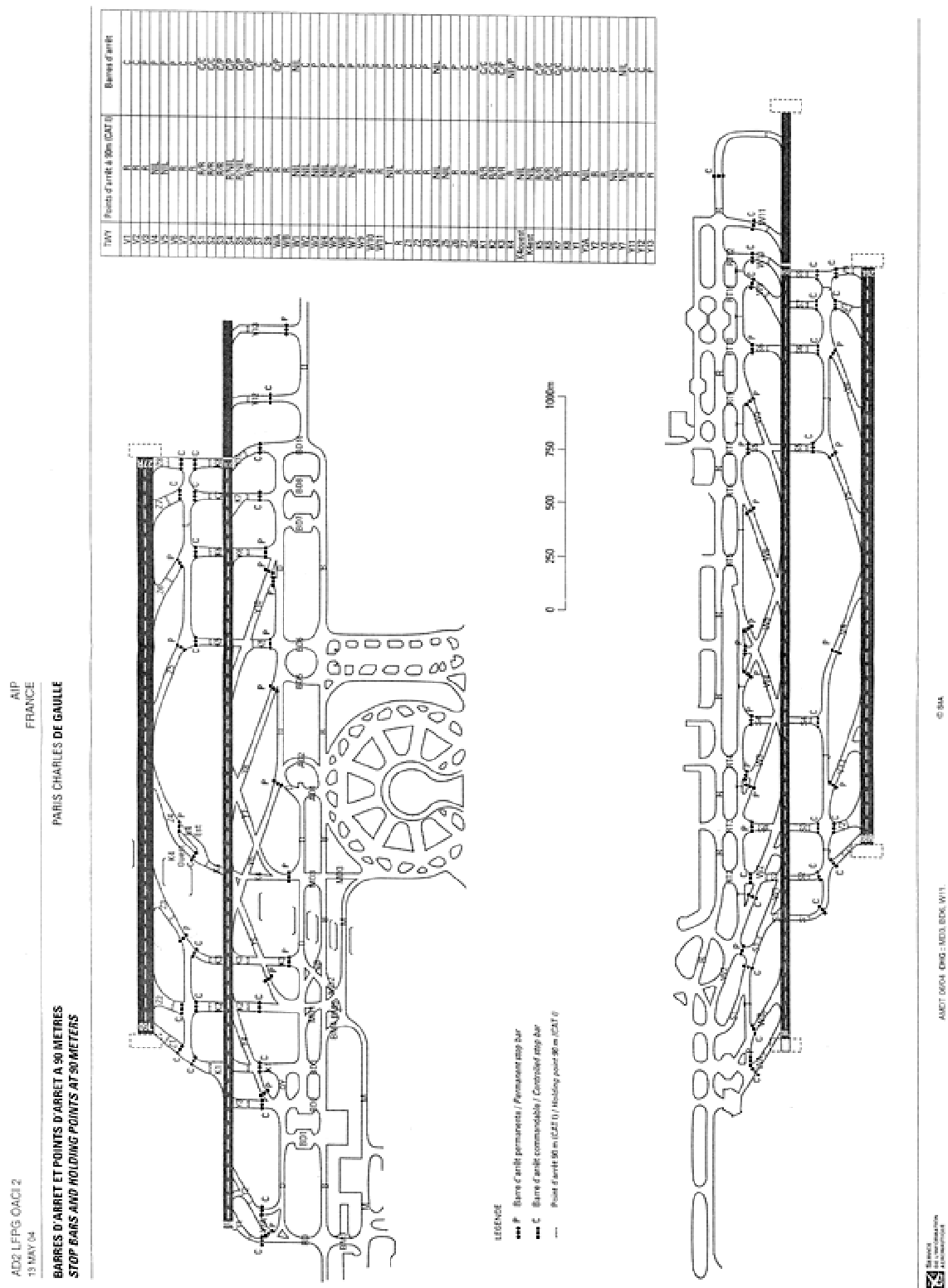


Figure III.4 Les points de contrôle pour la traversée des pistes  
(cas de l'aéroport de Paris Roissy – Charles de Gaulle)

## III.4 Les systèmes de localisation

Tous les moyens pouvant donner des indications sur la position ou l'identification d'un mobile peuvent être catalogués comme systèmes de localisation. On distingue différentes catégories de systèmes de localisation : les systèmes coopératifs, non coopératif, de couverture partielle ou totale, dépendants ou non dépendants.

	Non coopératifs	Coopératifs
Non dépendant Couverture totale	Les moyens humains Radar primaire de surface	Multilatération VHF ou UHF Multilateration mode S
Non dépendant Couverture ponctuelle	Capteurs hyper fréquences Capteurs optiques Capteurs acoustiques Capteurs infrarouges Boucles magnétiques	Porte mode S Radar secondaire dans l'axe d'approche
Dépendant		ADS ADS-B

**Table III.1 La classification des senseurs**

Pour la surveillance sol, il s'agit de centraliser l'information pour pouvoir mieux l'exploiter. Les capteurs non-coopératifs sont ceux qui permettent de détecter un mobile sans aucune intervention de celui-ci. Ce type de capteur sera toujours utile pour détecter les intrus ou les mobiles en panne. Les capteurs coopératifs sont ceux qui possèdent un élément actif du type transpondeur, qui permet d'obtenir une information personnalisée, plus riche. Pour les capteurs dépendants, c'est le mobile lui-même qui génère l'information et la transmet.

Les barres d'arrêt sont des feux rouges encastrées qui interdisent l'accès à la piste. Pour autoriser l'accès, le contrôleur doit éteindre ces feux qui se rallument automatiquement après le passage de l'avion grâce à un capteur ponctuel.

Dans le cadre des capteurs dépendants c'est le mobile qui effectue la plus grosse part du travail en évaluant sa position et en la transmettant vers le sol avec son identification. C'est ce qu'on appelle l'ADS (Automatic Dependant Surveillance). Pour l'application sol, ce principe est surtout intéressant dans sa version ADS-B (comme Broadcast, ce qui veut dire : diffusion permanente de l'information).

Le principe de l'ADS-B est de transmettre Automatiquement (sans commande du pilote) différents paramètres, telles que l'identification de l'avion, sa position, sa route, sa vitesse (Dépendance vis à vis des autres senseurs de l'avion), pour des applications de Surveillance. Ces messages seront diffusés (Broadcast) par le biais d'une liaison de données vers des destinataires non désignés qui peuvent être d'autres aéronefs, des stations sol, des véhicules sol, la tour de contrôle, etc. Ces utilisateurs potentiels, dont l'avion émettant le message n'a pas connaissance, ont le choix de traiter ou de rejeter les messages reçus (en fonction principalement de leurs situations respectives). L'ADS-B n'est pas un système de surveillance, ce n'est qu'un moyen de la réaliser.

Actuellement, on enregistre de plus en plus de cas d'intrusions intempestives de piste alors qu'un aéronef est en train d'atterrir ou de décoller, ce qui pourrait avoir des conséquences catastrophiques. L'ADS-B est l'un des systèmes susceptibles d'améliorer la sécurité aéroportuaire, en réduisant la fréquence de ce type d'événement. La première étape nécessaire est d'améliorer la navigation sur l'aéroport en transmettant au pilote une carte électronique de l'aérodrome, associée à une indication de sa position. Cette fonction (indépendante de l'ADS-B) pourrait déjà améliorer la sécurité en évitant que, du fait des conditions météorologiques ou d'une méconnaissance de l'aérodrome, des véhicules ou des aéronefs se perdent sur la plateforme.

L'étape suivante pourrait consister à doter les véhicules et les aéronefs d'un équipement ADS-B afin que, sur le même écran embarqué, un équipage puisse visualiser la position de tous les mobiles environnants. Par la suite des alarmes pourraient être implémentées afin d'éviter que des mobiles (aéronefs ou véhicules d'aéroports) ne pénètrent dans des zones dangereuses. Côté ATC, l'information ADS-B serait utilisée comme une donnée supplémentaire aux moyens de surveillance déjà existants (radar de surface).

D'autres fonctionnalités pourraient être implémentées comme la transmission au pilote, par liaison de données, de son cheminement à l'arrivée ou au départ. Cette fonctionnalité est indépendante de l'ADS-B.

Malheureusement ce système n'est pas encore généralisé et il faudra attendre entre cinq et dix ans avant de pouvoir l'exploiter.

## III.5 Les systèmes de communication

Le réseau de communication de l'aéroport assure la transmission de données de façon à rendre possible :

- la prestation des services de contrôle de la circulation aérienne,
- l'échange d'informations entre les acteurs du trafic aéroportuaire,
- d'autres applications comme les communications administratives aéronautiques.

Le lien direct entre les usagers de la plate-forme aéroportuaire est assuré par des liaisons radio, notamment des liaisons vocales. L'information requise par les pilotes ou les conducteurs de véhicules est transmise par les contrôleurs de trafic au sol ou par les conducteurs directement. Dans les deux cas, la transmission s'effectue par voie radio en mode vocal.

Le système de communication comporte d'autres composantes : les systèmes de communication de données, les systèmes de surveillance dépendante automatique et les systèmes de surveillance non renseignés. Tous font partie des systèmes de surveillance et de localisation.

Le plus important système de communication reste celui associé au système de contrôle du trafic. Ce système est aujourd'hui encore entièrement vocal et comporte un langage spécialisé avec une phraséologie standard. Même si la différence entre le message écrit et celui transmis est très grande, l'ensemble des acteurs du trafic sol doivent communiquer ainsi. Pour des raisons purement humaines ou pour des problèmes d'ordre technique, la communication peut devenir très lente voire impossible. Dans des conditions de demande de trafic élevée, les canaux de communication deviennent saturés et la cohérence des transmissions peut ne plus être assurée.

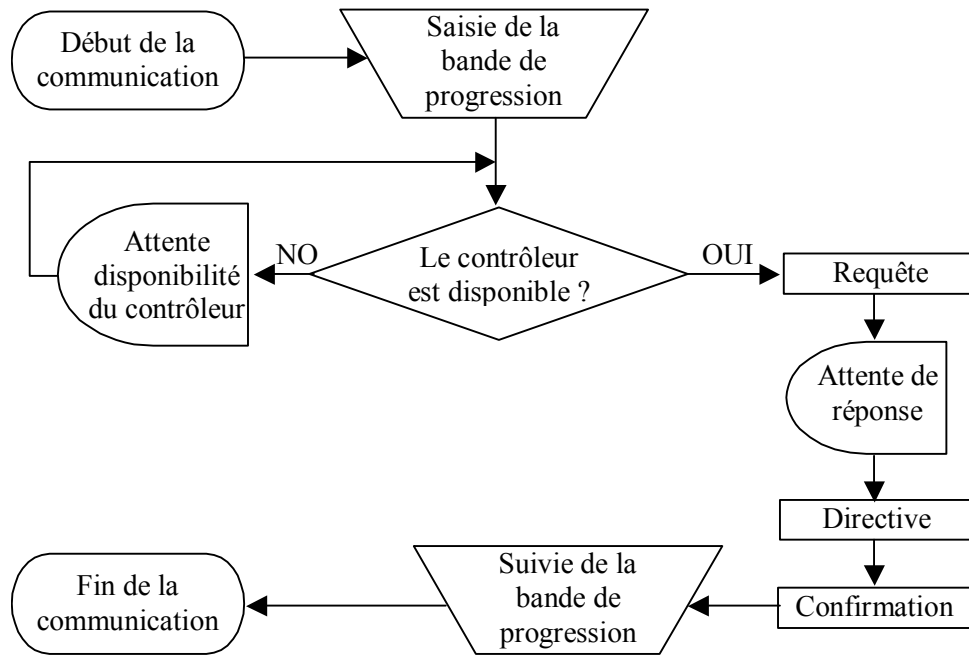


Figure III.5 La diagramme du protocole de communication entre le contrôleur et le pilote

## III.6 Problèmes opérationnels de la circulation au sol des avions

### III.6.1 Problèmes liés à la météorologie

Les conditions météorologiques jouent un rôle important pour le bon déroulement des opérations sur la plate-forme aéroportuaire. Trois facteurs majeurs posent des problèmes pour le trafic sol : les vents traversiers, les précipitations et la visibilité.

Les vents traversiers influent sur les atterrissages et les décollages. Le service météo de l'aéroport se doit d'informer les usagers de la direction et de l'intensité des vents traversiers.

Les précipitations modifient l'adhérence des pneus, avec un impact direct sur la sécurité et la manœuvrabilité de l'avion. Les opérations sur la plate-forme aéroportuaire se déroulent jusqu'à un niveau limite des précipitations. Au delà de cette limite tout mouvement sera interdit. Les précipitations peuvent être sous forme de pluie, de neige, de glace etc. La formation de la glace pose des problèmes particulières au moment du décollage. Pour

combattre la formation et le dépôt de glace sur les ailes des avions, des zones de dégivrage sont prévues sur les aires de trafic de certains aéroports (ADP, Toulouse-Blagnac).

Les conditions de visibilité influent sur l'écoulement du trafic. La règle « vu et être vu » continue à être appliquée pour le contrôle de la circulation sur la plate-forme aéroportuaire. Les conditions de visibilité sont classées en quatre niveaux (voir paragraphe I.6.3).

En ce qui concerne les manœuvres d'atterrissage et plus particulièrement d'atterrissage automatique, les conditions de visibilité peuvent être classées :

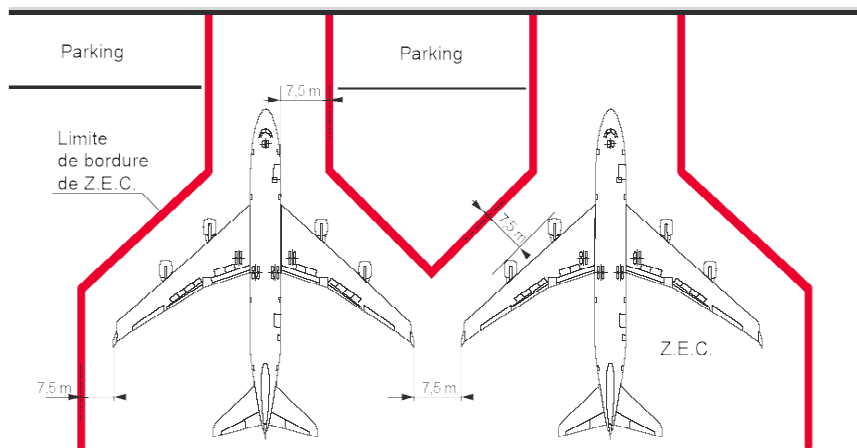
- CAT I : visibilité supérieure à 800m,
- CAT II : visibilité inférieure à 800m et supérieure à 400m, à partir de ce niveau des procédures spéciales sont appliquées pour la gestion de mouvement des avions au sol,
- CAT IIIA : visibilité inférieure à 400m et supérieure à 200m,
- CAT IIIB : visibilité inférieure à 200m et supérieure à 50m,
- CAT IIIC : visibilité inférieure à 50m.

### **III.6.2 Les problèmes liés aux performances des avions**

Les performances des avions au sol sont caractérisées principalement par :

- les vitesses de décollage et d'atterrissage et les durées d'occupation des pistes (en fait fonction de la masse de l'avion et des conditions météorologiques) ;
- la vitesse de déplacement de l'avion sur les voies de circulation (20 nœuds en général) ;
- les temps et distances standards de freinage et d'accélération ;
- les rayons de virage minimaux ;
- les vitesses maximales en virage ;
- l'encombrement de l'avion (envergure et longueur) au roulage et au poste de stationnement ;
- les capacités de manœuvre autonome au poste de stationnement ;
- la compatibilité avec les moyens d'embarquement/débarquement des passagers et du fret.

La séparation longitudinale au roulage des aéronefs est de 75m et de 90m par mauvaise visibilité. La séparation minimale entre deux d'avions (queue, extrémité de l'aile) au poste de stationnement est de 7,5 mètres.



**Figure III.6 Zone de protection des postes de stationnement**

En ce qui concerne la capacité opérationnelle des pistes on est amené à distinguer cinq classes d'aéronefs qui déterminent les séparations minimales à l'atterrissage et au décollage entre deux avions. Ce critère de séparation considère en fait le danger constitué par les turbulences de sillage qui ont déjà été la cause de plusieurs accidents :

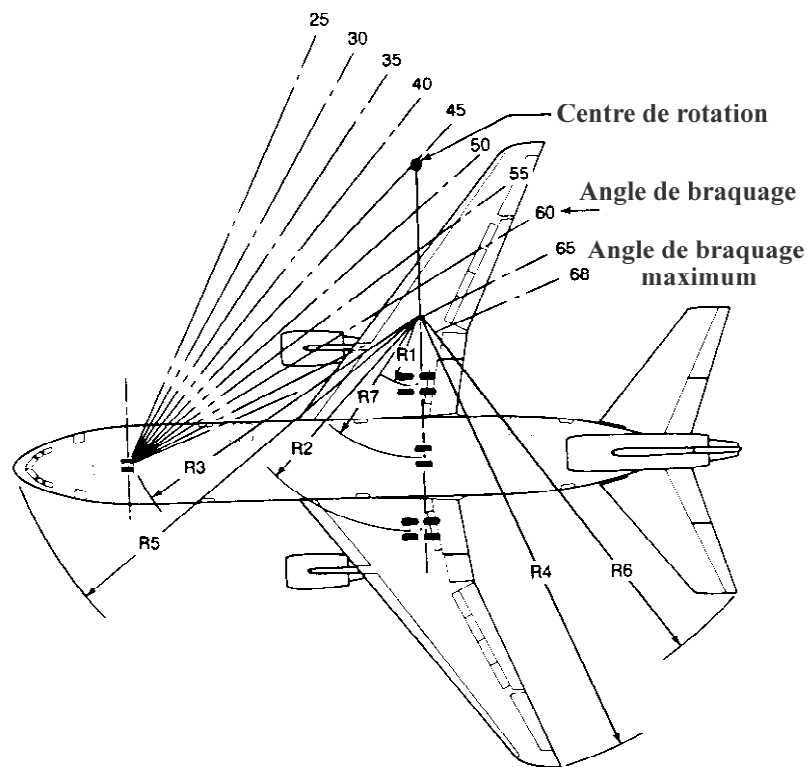
- classe 1 : appareils de masse maximale au décollage (MTWO) supérieure à 136 tonnes (par exemple B747, A300, DC10)
- classe 2 : appareils de masse maximale au décollage comprise entre 40 et 136 tonnes (B727, B737, A320, DC9)
- classe 3 : appareils de masse maximale au décollage comprise entre 5,7 et 40 tonnes (F27, F28, DH7, ATR42)
- classe 4 : appareils bimoteurs de moins de 5,7 tonnes (Beech99, BN2A, Twin-Otter)
- classe 5 : appareils monomoteurs de moins de 5,7 tonnes (les avions d'aéro-club, de travail aérien)

Ce critère est basé sur les masses maximales au décollage, étroitement liées à la taille des avions et donc aux turbulences. Les appareils de classe 5 volent presque toujours en VFR



(Visual Flight Rules), contrairement aux appareils de classe 4, ce qui modifie considérablement les règles de séparation.

Par exemple, un Airbus A320 est un avion de classe 2 (77 tonnes), avec 150 places dans la version passagers, de longueur totale de 37,57m et d'envergure de 34,10m.



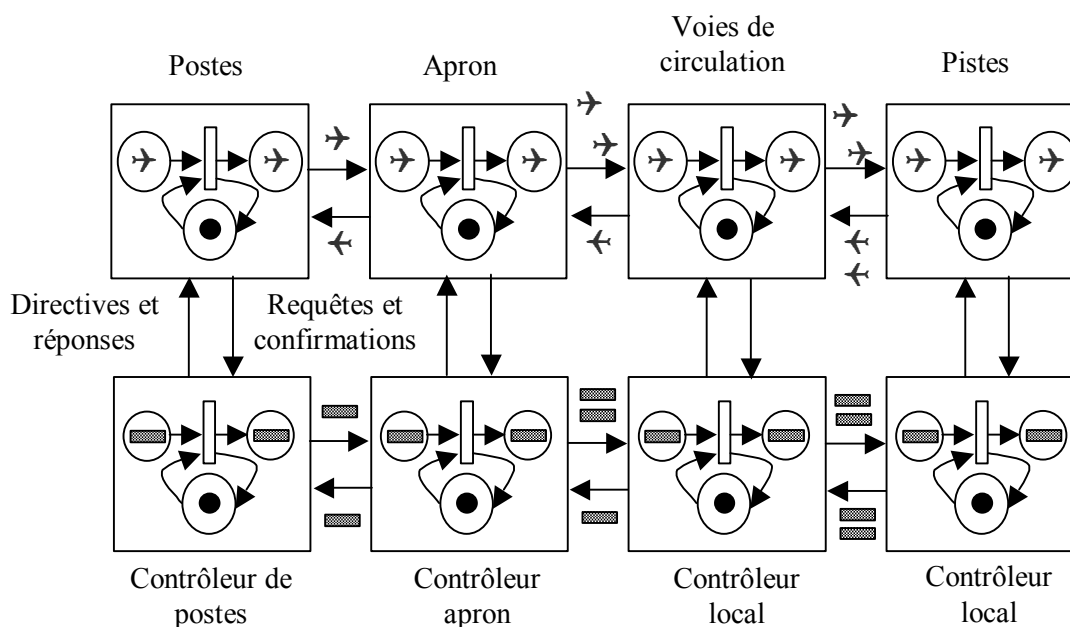
**Figure III.7 Manœuvrabilité de l'avion à très basse vitesse**

### **III.7 L'enjeu du contrôle de trafic avion au sol**

L'accroissement considérable du trafic aérien dans tous les grands aéroports du monde a entraîné une augmentation sensible sur les pistes, les voies de circulation et les aires de stationnement, du mouvement des avions mais aussi celui de véhicules divers. Aussi s'est-il avéré de plus en plus nécessaire de mettre à la disposition des contrôleurs, des systèmes donnant une image constamment mise à jour de l'ensemble de la situation qui règne sur les aéroports (radars de surveillance, détecteurs et senseurs, systèmes de positionnement par satellite embarqués etc.).

Les contrôleurs, sur les aéroports importants, ont des difficultés à maîtriser la situation qui s'avère critique face à l'augmentation du trafic et au nombre croissant de mouvements simultanés d'avions au sol. Cette situation va en s'empirant du fait de l'étendue toujours plus grande des installations aéroportuaires et de la complexité du réseau des voies de circulation, qui devient très difficile à surveiller.

Le contrôleur collecte les informations nécessaires à partir des observations et des compte-rendus météorologiques, des compte-rendus des pilotes et des observations visuelles ou radar des avions, des pistes, des voies de circulation et du trafic au sol. Il traite et combine ces informations et prend des décisions. Il met ces décisions en pratique en communiquant les informations appropriées et les instructions nécessaires aux pilotes par radio.



**Figure III.8 Le flux des avions et l'information échangée avec la tour de contrôle**

Le pilote et le contrôleur forment une boucle fermée de contrôle tout au long de la phase d'atterrissage et durant la phase de roulage jusqu'au point de stationnement de l'avion. Dans ce système, toutes les données et les informations sont perçues par des opérateurs humains (par des moyens visuels et audio), traitées par des opérateurs humains et traduites en action par des opérateurs humains. Ce type de contrôle ne suffira pas dans l'avenir, pour deux raisons principales :

- Le développement et l'utilisation des systèmes opérationnels d'atterrissage tous temps vont permettre d'effectuer des décollages et des atterrissages dans les conditions OACI des catégories IIIA et IIIB. La visibilité n'est plus alors suffisante pour que le contrôleur assure un écoulement sûr et rapide du trafic et la coordination optimale des mouvements simultanés des avions. Les pilotes ne disposent non plus d'une visibilité suffisante dans les conditions des catégories IIIA et IIIB pour rouler en sécurité et rapidement.
- L'augmentation du nombre de mouvements au sol oblige le contrôleur à intervenir en même temps dans plusieurs boucles (pilote-contrôleur) indépendantes tout en optimisant l'ensemble du trafic sol de manière à éviter les encombrements et les arrêts de la circulation, et en assurant un niveau élevé de la sécurité.

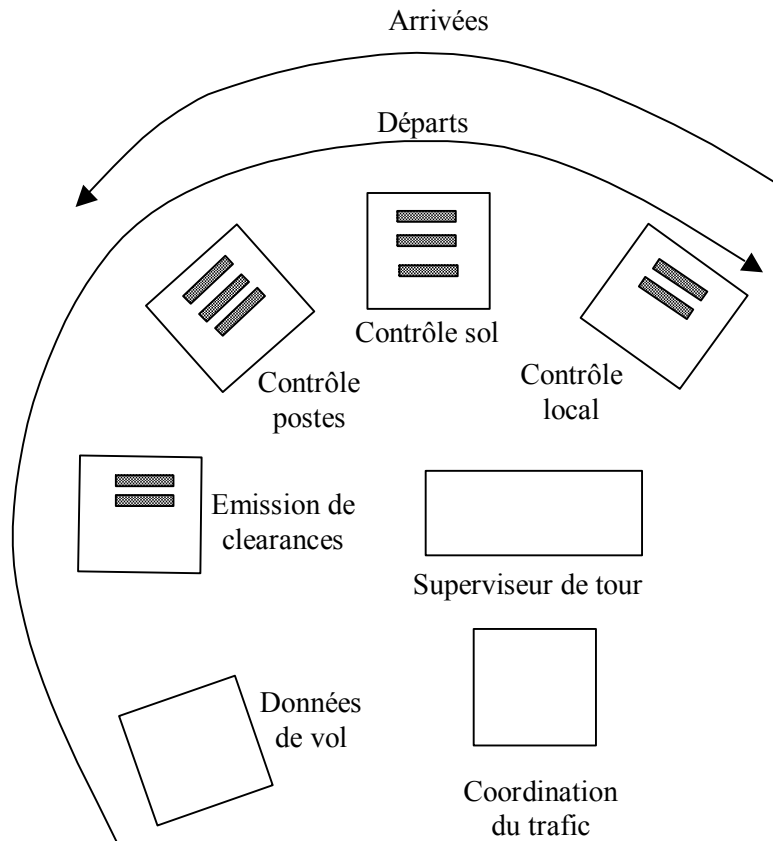
Des améliorations substantielles ne pouvaient être attendues par des simples modifications apportées au concept de contrôle actuel. Des systèmes ont donc été étudiés qui permettraient dans un premier stade au contrôleur de se décharger de certaines tâches secondaires pour se consacrer davantage au contrôle proprement dit, à la sécurité et à la surveillance du trafic. Des systèmes entièrement automatiques, intégrés au dispositif global de contrôle sont également prévus. La sécurité demeure l'un des soucis essentiels et constants des services responsables du guidage et du contrôle de la circulation au sol.

### **III.8 Exemple d'organisation du poste de contrôle du trafic au sol**

Celui-ci développe (voir figure III.9) plusieurs fonctions : contrôle local, contrôle sol, contrôle de poste, émission de clearances, données de vol, coordination du trafic, supervision de tour, monitoring à vue, représentation du trafic (écran numérique, écran radar).

La tour de contrôle est responsable de la gestion des mouvements des avions au sol. Dans le cas des départs, les contrôleurs prennent en charge l'avion de la compagnie aérienne dès le départ du poste de stationnement (repoussage ou roulage) et jusqu'à l'entrée dans l'espace aérien, quand ils le passent aux contrôleurs de trafic en route. Concernant les arrivées, l'avion est pris en charge de la part des contrôleurs aériens au moment quand il entame l'approche finale, et il est guidé à travers les phases d'atterrissage et de roulage au sol jusqu'à l'arrivée au poste, où il est confié à la compagnie aérienne.

---



**Figure III.9 Exemple d'organisation de la tour de contrôle**

### **III.8.1 Les différentes fonctions associées au contrôle du trafic sol**

Le contrôle local est responsable des arrivées et des départs des avions sur les pistes, ainsi que des avions opérant dans l'espace aérien de l'aéroport. Plusieurs contrôleurs locaux peuvent être actifs simultanément.

Le contrôle sol est responsable du guidage des avions au sol ne nécessitant pas la traversée des pistes actives (cette opération étant sous la responsabilité du contrôle local). Le contrôle sol peut émettre la clearance pour effectuer le repoussage, le roulage, il peut attribuer des chemins vers chaque piste et finalement il remet le contrôle de l'avion et la communication au contrôle local.

Le contrôleur de poste est responsable de la gestion des avions au départ. Le contrôleur reçoit un appel de la part du pilote, lui indiquant que l'appareil est prêt pour le repoussage (s'il s'agit d'un jet) ou pour le roulage (pour les autres avions), et il marque le moment de l'appel sur la bande de progression du vol. Le contrôleur de poste fait alors une estimation du temps de

repoussage/roulage dans le cas où une attente est nécessaire, et cette estimation est également inscrite sur la bande de progression du vol. Au final, le contrôle poste remet l'avion au contrôle sol selon de principe « premier arrivé, premier servi », sauf conditions spéciales ou une restriction concernant l'instant de décollage, qui nécessitent l'application des procédures différentes.

L'émission de clearances concerne les clearances de départ. Le contrôleur de clearances vérifie que les plans de vol sont complets et corrects, et communique verbalement l'altitude initiale. L'émission de clearances peut être confirmée par le contrôle de poste.

Le responsable des données de vol distribue l'information. Il vérifie l'intégrité des plans de vol avant de remettre la bande de progression du vol au contrôleur de clearances.

Le coordinateur du trafic transmet toutes les restrictions du trafic au sol, ainsi que les alertes météorologiques, au superviseur de la tour. Il fait le compte rendu de toutes les restrictions de trafic influant sur l'activité de la piste et des événements spéciaux. En coordination avec le superviseur de la tour et le contrôleur de secteur aérien voisin de l'aéroport, il décide du taux d'arrivées et de départs de l'aéroport.

La supervision de tour concerne la planification stratégique, les décisions tactiques et la gestion du nombre de contrôleurs assignés à différentes fonctions de contrôle du trafic des avions au sol.

Le monitoring à vue est la pratique courante, dans des conditions de bonne visibilité, employée par les contrôleurs de trafic afin d'évaluer l'état de trafic.

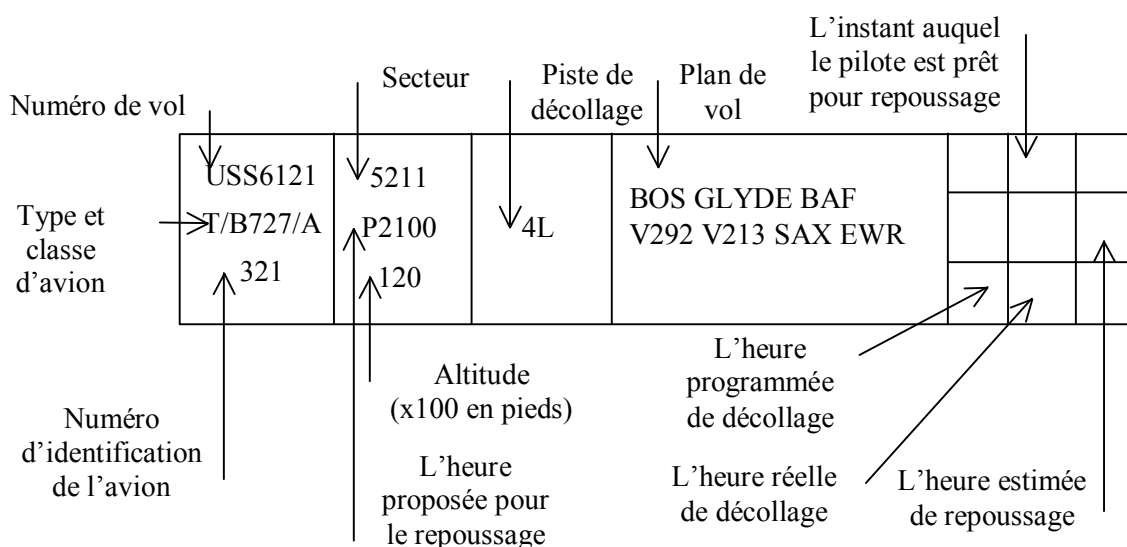
La représentation du trafic peut être réalisée sur des écrans radar. Ainsi les positions des avions (et d'autres véhicules) au sol et leurs identificateurs peuvent être affichés. Ce type de représentation est utilisée principalement dans des conditions de mauvaise visibilité où le monitoring à vue est inefficace.

La représentation radar du trafic aérien environnant est utilisé principalement par le contrôle local.

La communication radio entre les pilotes et les contrôleurs est encore le moyen d'échange de l'information nécessaire au bon déroulement de mouvement des avions au sol : état de l'avion, les clearances, les demandes de repoussage, les points d'arrêts, les chemins à suivre etc.

### III.8.2 Les bandes de progression

Les bandes de progression (« strips ») sont utilisées par les contrôleurs de trafic au sol pour enregistrer l'évolution des avions. A chaque départ est associée une bande de progression (voir figure III.10), imprimée automatiquement par le système de données de vol une demi heure avant le temps de départ programmé.



**Figure III.10 Exemple de bande de progression**

Les bandes de progression sont utilisées comme source d'information concernant le départ : l'avion, son type, son identification, le temps désiré de départ proposé par la compagnie aérienne, le plan de vol (jusqu'à l'entrée dans l'espace aérien contrôlé) et les restrictions imposées tout au long du roulage au sol. Les bandes de progression sont utilisées aussi comme un outil de communication entre les contrôleurs de trafic au sol. Les bandes de progression passent d'un contrôleur à l'autre suivent la progression de l'avion au sol et le transit des différentes zones de l'aéroport contrôlées par les contrôleurs respectifs. Les contrôleurs notent (en écrivant à la main) sur les bandes de progression l'information additionnelle comme la piste assigné pour le décollage, les modifications de l'acheminement de l'avion et certains instants de temps critiques (l'instant où le pilote est prêt pour quitter le poste de stationnement, l'instant de décollage).

## III.9 Conclusion

La sécurité et la régularité de l'écoulement du trafic ne sont pas les seuls soucis des services responsables de la circulation au sol des avions : la rapidité est plus que jamais à l'ordre du jour. Le temps que perdent les avions à circuler au sol parmi les méandres des voies de circulation et des files d'attente est considérable et il en résulte un gaspillage d'énergie et une augmentation importante de la consommation de carburant (et des coûts d'exploitation), du bruit et de la pollution environnementale. Une meilleure utilisation du réseau des voies de circulation et certaines solutions visant à réduire le temps de roulage pourraient y remédier et entraîner des économies de carburant et des coûts d'exploitation. Ceci passe sûrement par le développement de systèmes d'aide à la décision qui permettront d'améliorer, voire d'optimiser, l'écoulement du trafic sur la plate-forme aéroportuaire et dans son espace aérien immédiat.







## **Partie 2 – La capacité aéroportuaire et la circulation au sol**



# Chapitre IV – La capacité aéroportuaire

## IV.1 Introduction

La croissance soutenue du trafic aérien commercial depuis la fin des années 80 a fait naître diverses interrogations sur les aéroports dont on prévoyait à court ou moyen terme la saturation des infrastructures. Cette situation a conduit à l'approfondissement de plusieurs concepts influant sur les décisions d'investissement et d'organisation.

Parmi ces concepts, c'est celui de capacité que nous allons examiner ici, en nous efforçant de présenter et de commenter les différents aspects qu'il a pu prendre, suivant les époques et les lieux. Notre but sera de fournir des éléments pour l'analyse détaillée de ce problème, et éventuellement de proposer une nouvelle méthode pour l'évaluation globale de la capacité aéroportuaire.

## IV.2 Le système aéroportuaire et sa capacité

Une première définition de la capacité adoptée par les services de l'aviation civile concerne : « la capacité théorique ou cadence qui est définie comme le nombre maximum d'aéronefs que le système de pistes pourrait physiquement écouler dans l'unité de temps (l'heure) sans tenir compte de la qualité de service » [STBA, 1975]. En principe, celle-ci peut être estimée en utilisant la théorie des files d'attente.

La prise en compte théorique d'aléas fréquents notamment des incertitudes sur l'heure de présentation en début de finale, sur la vitesse des aéronefs, sur la vitesse du vent, a conduit à définir la capacité pratique comme étant « le débit maximal de trafic écoulé avec une qualité de service égale ou supérieure à un seuil indiqué au préalable » [STBA, 1978], le seuil étant défini souvent par une attente moyenne de 4 minutes. Le passage de la capacité théorique (CT) à la capacité pratique (CP) a été strictement défini par la table de conversion IV.1.

<b>CT</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
<b>CP</b>	0	0	0	0	0	2	2	3	4	5	6	6	7	8	9	10	11	12	13	14

<b>CT</b>	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
<b>CP</b>	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34

<b>CT</b>	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
<b>CP</b>	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54

<b>CT</b>	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
<b>CP</b>	55	56	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75

**Table IV.1 Table de conversion capacité théorique (CT) → capacité pratique (CP), en termes de nombres de mouvements par heure**

L'expérience acquise au cours des dernières décennies a montré que cette méthode conduit à des erreurs importantes lorsque les niveaux de trafic sont non seulement élevés, mais présentent aussi d'importantes fluctuations. Ceci a entraîné l'évolution de la notion de capacité en spécifiant le régime de fonctionnement associé. Ainsi une autre définition a été proposée : « la capacité est le nombre maximum de mouvements qu'un aéroport peut écouler pendant un intervalle de temps donné quand la demande est continue. » [Horonjeff, 1975]. Dans cette optique plusieurs capacités peuvent être définies :

- La capacité finale qui est le nombre maximum d'avions qui peut être traité par la plate-forme pendant un intervalle de temps donné avec un niveau constant de la demande.
- La capacité pratique qui est le nombre d'avions qui peut évoluer sur la plate-forme pendant un intervalle de temps donné avec un niveau moyen de retard prédéfini.

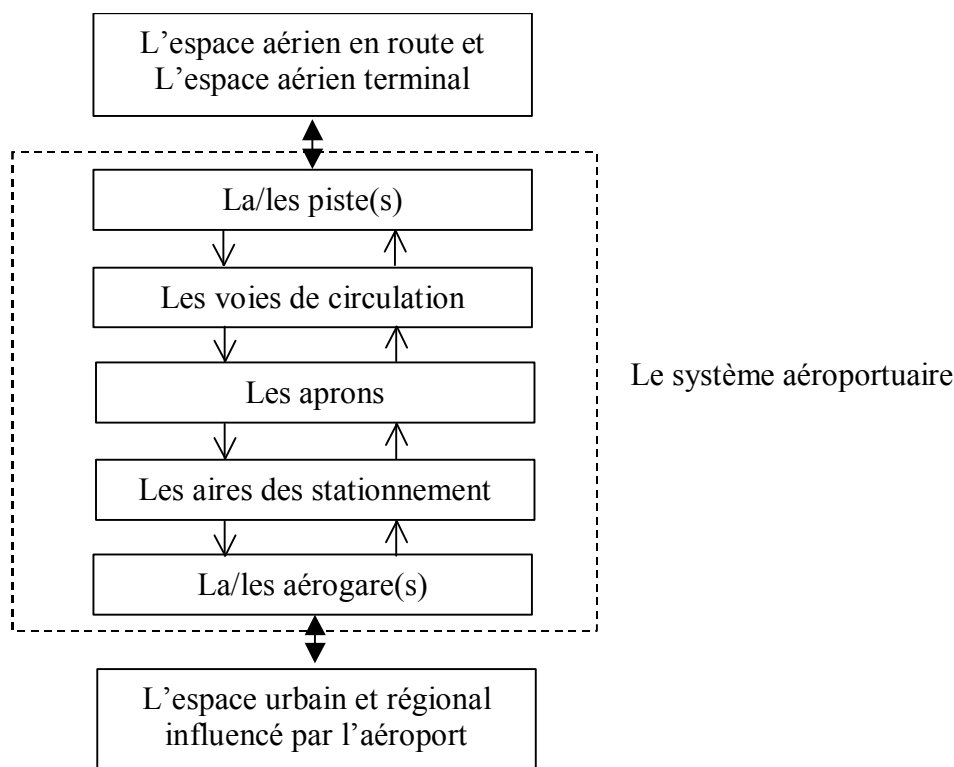
Cette capacité pratique tient compte des aléas qui interviennent pendant les manœuvres des avions au sol. La capacité pratique de l'aéroport résulte de la confrontation entre d'une part l'infrastructure physique de l'aéroport, avec les procédures opérationnelles qui y sont mises en œuvre (c'est l'offre) et d'autre part la demande de service, caractérisée par sa composition (les types d'avions mis en jeu), son caractère aléatoire et ses fluctuations.

## IV.3 Les facteurs influant sur la capacité

Des nombreux facteurs influent sur la capacité pratique d'une plate-forme aéroportuaire :

- la configuration de l'aéroport (pistes, terminaux, géométrie et dimensions) : les distances à parcourir, la disposition relative entre les pistes (phénomènes de couplage entre deux pistes parallèles, utilisation exclusive de pistes sécantes) influencent directement la capacité ;
- la demande (niveau et fluctuations de celle-ci, composition du trafic, programmation des vols) : les espacements temporels entre les opérations d'arrivée et de départ notamment au niveau des pistes, ont un rôle important sur la capacité ;
- la charge de travail des contrôleurs du trafic au sol : lorsque les contrôleurs arrivent à saturation de leur charge de travail ils sont amenés à mettre en attente les aéronefs (aux postes de stationnement au sol ou sur des hippodromes en l'air) jusqu'à ce que leur niveau de disponibilité leur permette de les traiter en toute sécurité ;
- les conditions météorologiques : celle-ci conduisent à augmenter les minima de séparation entre les aéronefs et donc à diminuer les cadences de traitement ;
- la disponibilité d'équipements auxiliaires de manœuvre (repoussage, tracteurs, passerelles etc.) : des équipements en nombre insuffisant devront être partagés, ce qui peut conduire à des attentes notamment lorsque le niveau de la demande est élevée et que des perturbations ont détruit la programmation qui était faite pour leur utilisation ;
- les contraintes liées à la protection de l'environnement (limitations des opérations compte tenu des nuisances sonores) : c'est le cas notamment lorsque des trajectoires d'approche et de montée plus longues sont rendues nécessaires ou lorsque des limitations de mouvements (pouvant aller jusqu'à couvre feu) sont imposées par les autorités aéroportuaires liés notamment à la pression des communautés du voisinage.

La capacité du système aéroportuaire, côté air, résulte de façon complexe de la capacité de chacun de ses sous systèmes : les postes de stationnement, les aprons, les voies de circulation et les pistes. La connexion entre la capacité de chaque sous système dépend non seulement de la configuration des interfaces de ceux-ci mais aussi des pratiques opérationnelles mises en oeuvre et il n'existe pas une formule unique permettant de calculer la capacité globale du système aéroportuaire.



**Figure IV.1 Le système aéroportuaire**

En règle générale, il est considéré que la capacité pratique du système aéroportuaire est donnée par la capacité pratique de la composante qui paraît être la plus critique : le sous système des pistes. Cette approche est simplificatrice et les restrictions à l'écoulement des flux de trafic qui traversent les autres composantes ne sont pas prises en compte. Or, celles-ci ne sont pas négligeables lorsque la demande conduit à la saturation de l'un de ces sous systèmes.

### IV.3.1 La capacité des sous systèmes

La capacité des postes de stationnement peut être représentée par le nombre maximum d'avions pouvant utiliser les postes de stationnement pendant un intervalle de temps avec un niveau constant de demande. Parmi les facteurs qui influencent la capacité des postes de stationnement on peut citer principalement : le nombre et le type de postes disponibles, la composition de la flotte (envergure des avions, moyens autonomes de manœuvre au poste), la qualité et le niveau des services du personnel sol, les restrictions imposées aux divers types d'avions et le type de vols opérés (vols domestiques, internationaux, intercontinentaux).

La capacité des aprons peut être représentée par le nombre maximum d'avions pouvant transiter par les aprons pendant un intervalle de temps avec un niveau constant de demande.

La capacité des voies de circulation peut être représentée par le nombre maximum d'avions pouvant évoluer dans ce sous système pendant un intervalle de temps donné de manière fluide avec un niveau constant de demande. Ce sous système est le plus dynamique au niveau du trafic sol et sa capacité dépend principalement du niveau et de la composition de la demande, de la disponibilité de l'infrastructure aéroportuaire, de la configuration de l'aéroport, de la politique de contrôle du trafic sol. Les voies de circulation sont l'interface entre les postes et les pistes, les deux flux du trafic (les arrivées et les départs) s'y croisent et leur interaction peut y être génératrice de problèmes (retards, conflits, sécurité). En conséquence une bonne gestion et coordination des mouvements y est essentielle pour assurer en toute sécurité une meilleure utilisation de cette ressource.

La capacité des pistes peut être représentée par le nombre maximum d'opérations (atterrissages et décollages) pouvant être effectués dans un intervalle de temps de manière fluide avec un niveau constant de demande. Etant donné le nombre limité de pistes pour un aéroport, ce sous système est souvent considéré comme le plus limitatif du point de vue de la capacité pratique. Les facteurs qui influent sur la capacité du sous système des pistes sont principalement : le niveau et la composition de la demande du trafic, la configuration de l'aéroport, les conditions météorologiques, la disponibilité des services du contrôle sol.

Ces définitions présentent de nombreuses déficiences : comment représenter la capacité d'un système distribué dans l'espace (sous la forme de réseau de voies de circulation, de zones de manœuvres, de places de stationnement, des pistes multiples) par un unique taux d'activité par unité de temps ? Comment tenir compte du degré d'efficacité des procédures opérationnelles utilisées ? Comment tenir compte d'aléas qui présentent néanmoins certaines caractéristiques de régularité ?

## IV.4 Premiers modèles de la capacité d'un système de pistes

Plusieurs approches basées sur la théorie des files d'attente ont été très tôt développées pour évaluer la capacité d'un système de pistes qui a été souvent assimilée à celle de l'aéroport. En effet les opérations critiques se situant sur les pistes, celles-ci dévient les goulots d'étranglement de l'aéroport et sa capacité était considérée comme étant dictée par celle du système de pistes.

Un premier modèle d'évaluation de la capacité d'un système de piste est celui proposé par le STBA [STBA, 1975]. Le principe de calcul est basé sur l'application de la théorie de files d'attente à une seule piste. Quatre types de séquences d'opérations sont considérées : atterrissage suivi d'atterrissage, atterrissage suivi de décollage, décollage suivi d'atterrissage et décollage suivi de décollage. La cadence horaire  $C_H$  (nombre maximum moyen d'avions par heure qui peuvent être servis par la piste), y est donnée par la formule empirique:

$$C_H = \frac{1}{t_{AA}p^2 + (t_{AD} + t_{DA})p(1-p) + t_{DD}(1-p)^2},$$

où  $p$  est la proportion d'atterrissages sur les décollages,  $t_{AA}$  est le temps moyen d'occupation de la piste pour une opération atterrissage-atterrissage,  $t_{AD}$  est le temps moyen d'occupation de la piste pour une opération atterrissage-décollage,  $t_{DA}$  est le temps moyen d'occupation de la piste pour une opération décollage-atterrissage,  $t_{DD}$  est le temps moyen d'occupation de la piste pour une opération décollage-décollage.

Quelques valeurs standard pour  $t_{AA}$ ,  $t_{DD}$  et  $C_H$  sont :

$$60s \leq t_{AA} \leq 150s, \quad 50s \leq t_{DD} \leq 90s, \quad 30 \leq C_H \leq 80.$$

Ce modèle ne prend pas en compte la distribution des instants d'arrivée ou de départ des avions et est donc très peu précis.

Des modèles issus de la théorie des fils d'attente [Ashford et Wright, 1979] permettent de tenir compte de la variabilité des temps d'opération. Ainsi, supposant que la loi de présentation des avions dans le système est poissonnienne, que la politique de service est de type « premier arrivé premier servi » (FCFS) et que le système est à l'état stationnaire, on peut alors

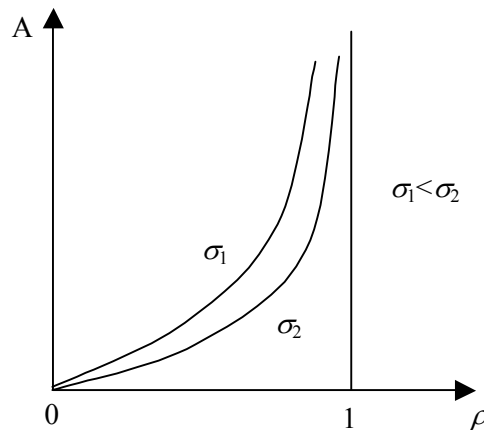


appliquer la formule de Pollaczek-Khinchin [Hillier et Lieberman, 2001], qui donne l'attente moyenne  $A$  dans le système :

$$A = \frac{s}{2} \cdot \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \left( 1 + \frac{\sigma^2}{s^2} \right)$$

où  $s = \frac{1}{\mu}$  est le temps de service moyen,  $\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda s$  est le taux de saturation,  $\lambda$  est le nombre moyen d'aéronefs qui demandent à être servis par unité de temps,  $\sigma$  est l'écart type du temps de service de moyenne  $s$ .

Il ne peut y avoir d'état stationnaire que si  $\lambda < \mu$ , sinon l'attente est infinie.



**Figure IV.2 Attente moyenne théorique en fonction du taux de saturation**

Ce modèle n'est que théorique car en fait l'hypothèse d'avoir un système aéroportuaire en état stationnaire n'est jamais parfaitement vérifiée, sauf pendant les périodes d'inactivité de l'aéroport.

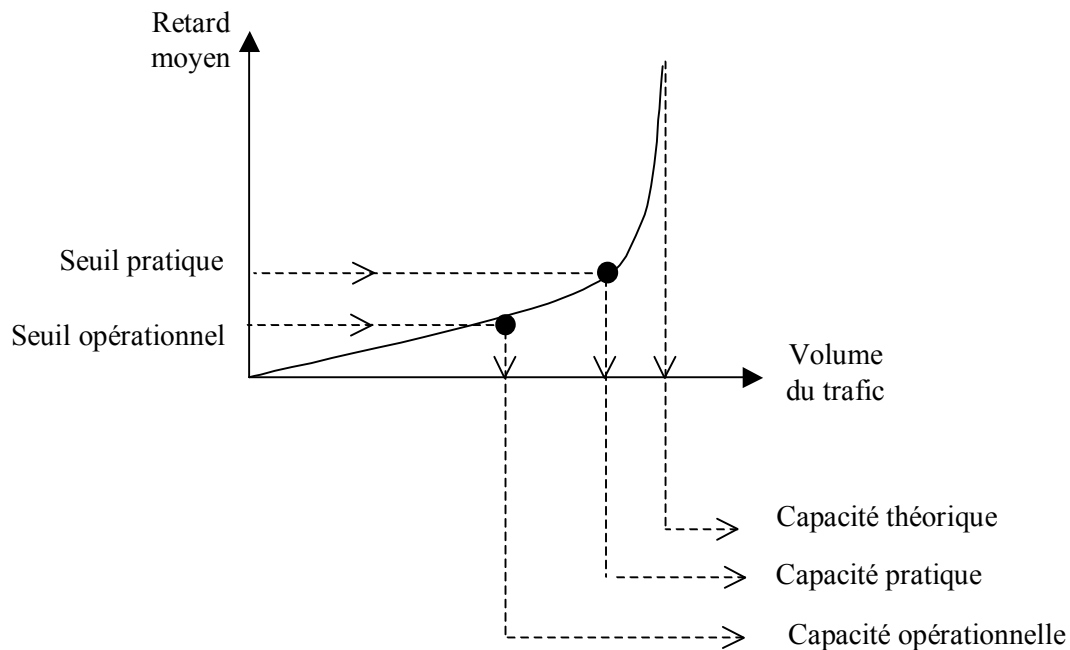
Il est possible de proposer des modèles d'estimation des retards moyens beaucoup plus complexes sans que la précision soit nécessairement meilleure, par exemple [STBA, 1975] a proposé le modèle suivant :

$$A_n = \frac{m}{2} \left( \frac{\rho-1}{2} + \frac{t(t\rho-1)}{2m^2} + \sqrt{\left( \frac{\rho-1}{2} + \frac{t(t\rho-1)}{2m^2} \right)^2 + \frac{t\rho}{m} \left( \frac{t(\rho-1)}{m} - 1 \right)} \right),$$

où  $A_n$  est l'attente moyenne totale au cours de la  $n^{\text{ième}}$  heure,  $s$  est le temps de service moyen,  $\sigma^2$  est la variance du temps de service,  $m = 2n-1$ ,  $n$  est le nombre d'heures dans le même état,

$t = s \left( 1 + \frac{\sigma^2}{2} \right)$ ,  $\lambda_n$  est la demande pendant la  $n^{\text{ième}}$  heure,  $\rho = \lambda_n s$ .

A quelques facteurs près, toutes ces formules présentent des similarités, elles relient par une relation croissante le taux de saturation et le retard moyen. En se fixant de seuils remarquables on déduit les niveaux de capacité opérationnelle et de capacité pratique (voir figure IV.3). Ainsi, se fixant un seuil d'attente de 4 minutes le [STBA, 1986] en déduisait la capacité pratique de la piste.



**Figure IV.3 La relation entre le retard, la capacité opérationnelle et la demande de trafic**

Ces modèles ne peuvent tenir compte de façon précise de la configuration des pistes et des conditions réelles de trafic. En effet ces modèles ne prennent en compte qu'un nombre limité de facteurs parmi une multitude de facteurs qui influent sur la capacité du système de pistes et considère un état stationnaire du système, ce qui ne correspond pas à une situation de fonctionnement habituel.

Compte tenu des limites des modèles ci-dessus, différents auteurs se sont intéressés à évaluer la capacité aéroportuaire à partir de données statistiques de ses activités.

## IV.5 Evaluation statistique de la capacité aéroportuaire

### IV.5.1 Une approche statistique globale

En général, les études développées dans ce sens ont un caractère global compte tenu de la forte interaction entre les flux d'arrivée et de départ sur une ou plusieurs pistes et il serait difficile d'en séparer les causes et les conséquences sur la capacité de chacun.

Par exemple, une approche statistique globale a été présentée dans [Gilbo, 1993]. La méthode empirique utilisée consiste à estimer la courbe de capacité de l'aéroport en considérant conjointement le nombre d'arrivées et de départs par période de 15 minutes. La méthode est fondée sur l'hypothèse selon laquelle pendant la période considérée, les arrivées et les départs observés pendant les heures de pointe reflètent la performance de l'aéroport à son niveau maximum de capacité. Par conséquent, la courbe enveloppant les données observées est considérée comme une évaluation de la capacité de l'aéroport.

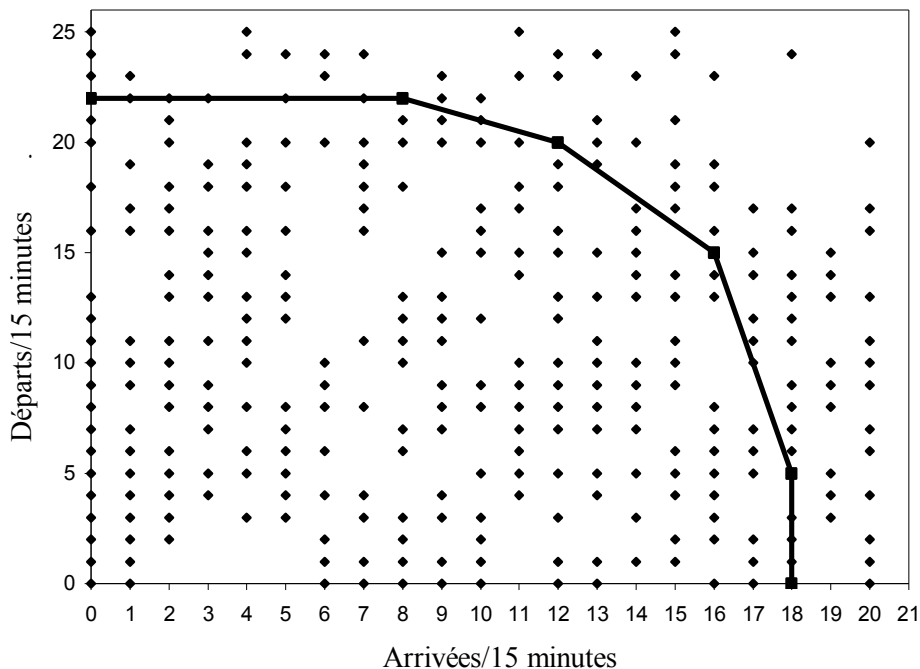


Figure IV.4 L'estimation de la capacité pratique selon Gilbo

Les données observées sont organisées selon les conditions de fonctionnement de l'aéroport afin de fournir des courbes de capacité pour différentes conditions spécifiques associées à des configurations des pistes et des conditions météorologiques différentes. On suppose que l'aéroport utilise un ensemble limité de configurations de pistes avec une fréquence suffisante pour retirer des données statistiques en nombre suffisant afin d'estimer valablement les courbes de capacité. Les conditions atmosphériques sont groupées par catégories opérationnelles, reflétant ainsi les limitations conventionnelles de visibilité et de plafond. Des courbes de capacité peuvent alors être obtenues pour ces différentes conditions atmosphériques.

La méthode considère à la fois le planning des arrivées/départs et l'ensemble des arrivées et des départs observés pendant des intervalles de 15 minutes sur une longue période (par exemple un mois ou plus). Les coordonnées de chaque point montrent le nombre d'arrivées et de départs effectués pendant le même intervalle de 15 minutes. La courbe de capacité est estimée en traçant une enveloppe convexe et linéaire par morceaux, pour couvrir l'ensemble de ces points. On en déduit une relation implicite reliant le nombre maximum de départs possibles au nombre d'arrivées.

Dans un autre travail, il a été établi par ([Newell, 1979] et [Swedish, 1981]) que théoriquement les capacités d'arrivée et de départ sont délimitées par une fonction non-linéaire convexe. On parlera de la frontière de Pareto.

La méthode proposée par Gilbo élimine certaines valeurs extrêmes observées qui reflètent des événements rares pendant lesquels un aéroport fonctionne au-delà de ses limites opérationnelles normales, c'est-à-dire pendant une période de temps très courte, dans des conditions pouvant éventuellement mettre en jeu la sécurité des opérations. Les critères de rejet sont : la proximité des observations extrêmes aux observations les plus fréquentes et la fréquence relative de ces observations extrêmes.

Il faut remarquer ici que le même niveau des performances peut ne pas être soutenu pendant plusieurs intervalles de 15 minutes consécutifs : la capacité à soutenir un nombre maximal « extrême » d'opérations pendant une longue période dépend de manière significative du facteur humain. D'ailleurs, les données statistiques montrent que le nombre maximum

d'arrivées et de départs pendant des intervalles de 30 minutes est inférieur au double de celui observé sur des périodes de 15 minutes, et de même pour des périodes de 60 minutes par rapport à des périodes de 30 minutes. Cet effet peut également être expliqué par les caractéristiques de la demande du trafic sur de plus longs intervalles de temps.

### IV.5.2 Critique de l'approche précédente

L'approche précédente d'évaluation de la capacité pratique d'un système de pistes peut être améliorée à partir des deux considérations suivantes :

- Pour une période d'observation donnée (15 minutes, 30 minutes, 45 minutes ou 60 minutes) les points extrêmes relevés, même s'ils se détachent nettement des valeurs beaucoup plus fréquentes, donnent une indication supplémentaire sur la capacité, que l'on pourrait qualifier de « potentielle » du système de pistes. Ainsi on peut tracer l'enveloppe convexe de l'ensemble des points observés, de façon à définir cette capacité potentielle qui sera en fait un majorant de la capacité pratique de Gilbo et une estimation par défaut de la capacité théorique.

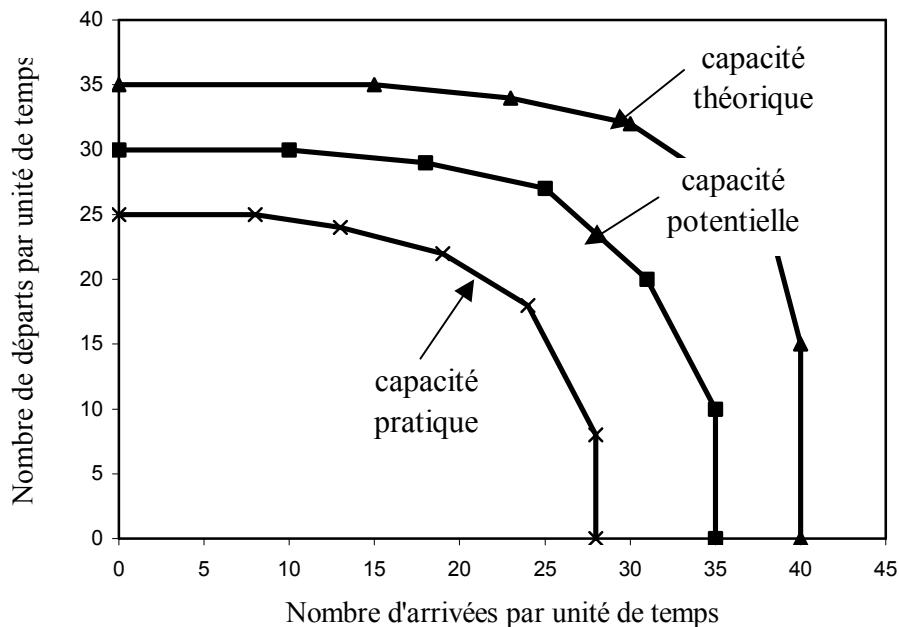
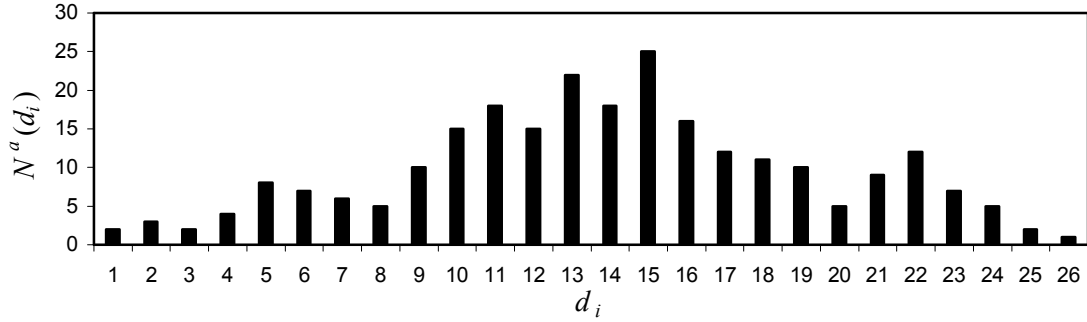


Figure IV.5 Estimation de la capacité potentielle et de la capacité théorique

- Dans son approche, Gilbo ne tient pas compte du fait que très souvent les atterrissages présentent un caractère prioritaire par rapport aux décollages. Aussi il semble judicieux d'établir pour un niveau d'atterrissage donné  $a_i$ , la distribution des fréquences de décollage des aéronefs.



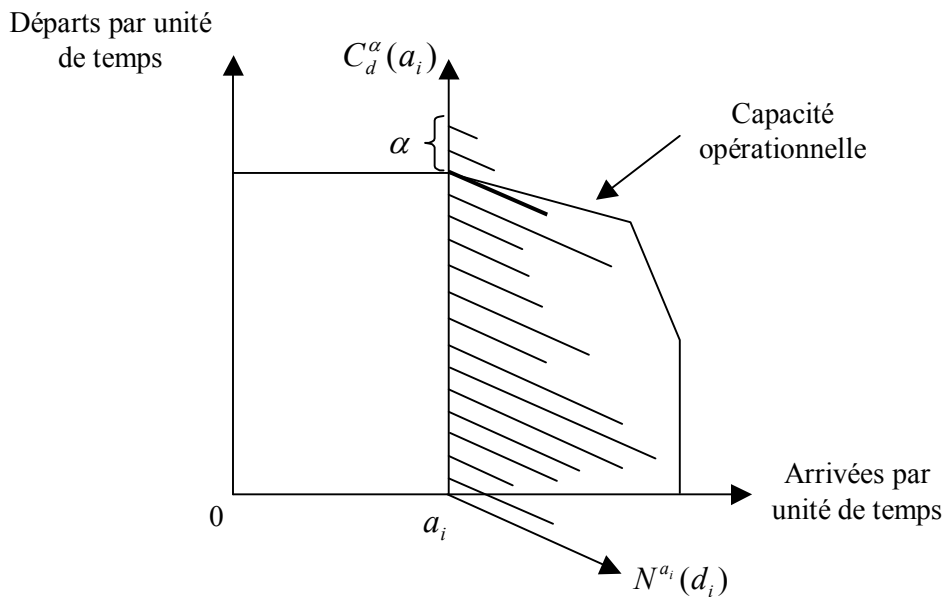
**Figure IV.6** Fréquences de décollage pour un niveau d'arrivées  $a_i$  donné par période de temps

On peut alors introduire a priori une capacité de décollage  $C_d^\alpha(a_i)$  définie par la relation :

$$\sum_{d_i=0}^{C_d^\alpha(a_i)} N^a(d_i) = (1-\alpha) \sum_{d_i=0}^{d_i^{\max}} N^a(d_i)$$

où  $\alpha$  est un paramètre réel positif compris entre 0 et 1, plutôt voisin de 0 (exemple  $\alpha = 0,08$ ).

La capacité opérationnelle est alors représentée dans les axes arrivées – départs par l'enveloppe convexe des points  $(a_j, C_d^\alpha(a_j))$ , remarquons bien que celle-ci tient compte ici de l'asymétrie opérationnelle existant entre arrivées et départs.



**Figure IV.7** Une représentation de la capacité opérationnelle

### IV.5.3 Prise en compte de l'état d'occupation de la plate-forme aéroportuaire

Dans les paragraphes précédents, on a assimilé la capacité de l'aéroport à celle de son système de pistes. Si l'on considère des périodes d'observation courtes, très souvent le nombre de départs et d'arrivées seront différents ; sur des périodes plus longues (30, 45 ou 60 minutes), suivant la période de la journée, ces différences pourront continuer à exister et même à s'amplifier. Ainsi peut-on avoir  $N_i^d > N_i^a$  sur une période de temps  $i$ , ici  $N_i^d$  est le nombre de départs et  $N_i^a$  le nombre d'arrivées pendant la période. Il est clair que la différence provient des avions qui étaient déjà présents sur la plate-forme. Notons  $N_i^0$  le nombre de ceux-ci.

Si une proportion  $\lambda_i^{ad}$  des avions qui arrivent dans la période  $i$  repartent pendant cette même période (ceci peut être le cas avec des avions opérés par des compagnies « low cost » ou avec des avions d'affaires ou de l'aviation générale), on aura nécessairement :

$$N_i^0 + \lambda_i^{ad} N_i^a - N_i^d \geq 0 \quad (IV.1)$$

Par ailleurs, en fin de période  $i$ , le nombre d'avions présents sur la plate-forme et en principe en stationnement, sera donné par :

$$N_{i+1}^0 = N_i^0 + N_i^a - N_i^d .$$

Soit  $S$  le nombre total de positions de stationnement de la plate-forme aéroportuaire, on doit avoir :

$$M^* \leq S$$

où  $M^*$  est le nombre maximum d'avions en stationnement pendant la période  $i$ .

Dans le cas où les distributions des arrivées et des départs sont uniformes, on aura :

$$M_i^* = N_i^0, \quad \text{si } N_i^d > N_i^a$$

$$M_i^* = N_{i+1}^0, \quad \text{si } N_i^d < N_i^a .$$

Dans le cas général, on pourra écrire :

$$M_i^* = M_i(N_i^0, N_i^a, N_i^d)$$

et la contrainte de capacité associée aux postes de stationnement s'écrira :

$$M_i(N_i^0, N_i^a, N_i^d) \leq S$$

à laquelle on pourra aussi associer la contrainte (IV.1).

Ainsi, il apparaît que la capacité de l'aéroport pour une période donnée  $i$  est en fait caractérisée par trois paramètres :

- Le nombre d'arrivées :  $N_i^a$ ,
- Le nombre de départs :  $N_i^d$ ,
- Le nombre d'appareils présents sur la plate-forme aéroportuaire au début de la période :  $N_i^0$ ,

et les approches statistiques précédentes seraient à reprendre en considérant ce paramètre additionnel.

Dans le cas simplifié où les distributions des arrivées et des départs sont uniformes, ces paramètres sont associés dans la satisfaction des différents contraintes :

Si  $N_i^a > N_i^d$  :

$$N_i^0 \leq S,$$

$$N_i^a \leq \frac{S}{1 - \lambda_i^{ad}} \quad (IV.2)$$

et

$$N_i^d \leq N_i^0 + \frac{\lambda_i^{ad}}{1 - \lambda_i^{ad}} S \quad (IV.3).$$

$$\text{Si } N_i^a \leq N_i^d \quad (IV.4)$$

il ne reste plus que deux contraintes :

$$N_i^0 \leq S \text{ et } N_i^d \leq N_i^0 + \lambda_i^{ad} N_i^a \quad (IV.5)$$

ou encore :

$$N_i^0 \leq S \text{ et } N_i^d \leq \frac{N_i^0}{1 - \lambda_i^{ad}} \quad (IV.6).$$

Ainsi dans ce cas particulier l'ensemble des contraintes (IV.2), (IV.3), (IV.4), (IV.5) ou (IV.6) définissent un domaine convexe qui généralise le résultat de convexité présenté par Gilbo.

Dans le cas général, le domaine admissible pour le triplet  $(N_i^0, N_i^a, N_i^d)$  dont les frontières définissent une capacité théorique pour la plate-forme aéroportuaire dans son ensemble, aura une géométrie qui dépendra des distributions des arrivées et des départs. Au niveau des pistes (cas  $N_i^0 = 0$  par exemple), il s'agira des distributions des instants d'atterrissage et de



décollage, et au niveau des postes de stationnement il s'agira des distributions des instants d'entrée au poste et de repoussage.

Il est intéressant de remarquer ici que la capacité de stationnement d'un aéroport n'est pas strictement définie par le nombre de postes de stationnement ; en effet, certains peuvent être si éloignés qu'ils ne seront pas utilisés dans des conditions normales d'opération alors qu'il peut exister des capacités de stationnement additionnelles momentanées sur certaines voies de circulation qui ne présentent pas à ce moment là de trafic traversier. Aussi, ces contraintes prennent un caractère élastique et il pourrait être utile d'envisager une représentation de ces niveaux de contraintes en utilisant les techniques de modélisation issues de la logique floue [Faye et al., 2000].

## IV.6 Conclusion

La notion de capacité aéroportuaire est une notion relativement ancienne que l'on retrouve dans les premiers ouvrages consacrés à la planification des installations aéroportuaires. Si, au départ, capacité aéroportuaire signifiait essentiellement capacité du système de pistes, l'introduction des préoccupations liées aux conditions d'écoulement du trafic des avions au sol conduit alors à revenir sur cette notion et à l'enrichir de nouvelles considérations.





# **Chapitre V – Les modèles d'évaluation de la capacité aéroportuaire**

## **V.1 Introduction**

Dans ce chapitre sont présentées les principales approches qui ont été développées pour estimer la capacité d'un terminal aéroportuaire. Il y a une très grande diversité dans celles-ci et on peut distinguer :

- les approches théoriques ou empiriques,
- les approches descriptives ou normatives,
- les approches déterministes ou stochastiques,
- les approches microscopiques, mésoscopiques ou macroscopiques,

et on se limitera à reprendre trois grandes approches qui recouvrent l'ensemble des aspects cités ci-dessus :

- une approche théorique microscopique et stochastique donnant lieu au développement d'un modèle analytique,
- l'approche de simulation avec ces différents niveaux d'analyse et de représentation, qui a donné lieu au développement de logiciels de simulation d'utilisation déjà assez répandue,
- l'approche d'optimisation qui met en œuvre les outils de la programmation mathématique pour explorer les conditions limites d'opération.

## **V.2 Un modèle théorique de la capacité associée aux pistes**

La NASA dans le cadre de l'étude ASAC (Aviation System Analysis Capability) a développé un modèle pour l'évaluation de la capacité associée aux pistes d'un aéroport [David et al., 1998]. Ce modèle est destiné à estimer la capacité d'un aéroport en fonction des conditions météorologiques, des procédures de gestion du trafic, de la demande du trafic et du niveau d'équipement de l'aéroport. La capacité est représentée comme la frontière de Pareto des flux

des départs et des arrivées par période de temps. La durée de cette période peut varier de 15 à 60 minutes. Cette frontière est la limite supérieure au delà de laquelle les nombres de départs et d'arrivées ne peuvent plus être augmentés simultanément.

### **V.2.1 Principes retenus par le modèle ASAC**

Ce modèle est basé sur la théorie des files d'attente, les arrivées étant supposées être aléatoires. Les paramètres du modèle comprennent les séparations standards au niveau des opérations sur la piste, les temps d'occupation de piste, le temps de réponse du contrôleur de trafic sol et d'autres règles imposées par les opérations dans des mauvaises conditions de visibilité. Le modèle reprend les incertitudes de la position et de la vitesse d'avion en vol dans la phase d'approche finale. Ces incertitudes influent sur les marges adoptées dans les contraintes de séparation entre les avions. D'autres incertitudes prises en compte par le modèle sont celles dues aux délais de communication et à la distribution de la vitesse du vent.

L'évaluation de la capacité des pistes est réalisée à l'aide d'un module d'estimation des délais, et plus particulièrement des délais d'arrivées.

### **V.2.2 Traitement des flux dans le modèle ASAC**

Dans un premier temps seules sont considérées les arrivées et il est supposé [David et al., 1998] qu'une séparation standard en vol est déjà imposée par les contrôleurs du trafic dans la TMA et qu'elle est maintenue au niveau de l'approche finale. Les notations suivantes sont utilisées :

$\mu_A$  est la différence moyenne en temps entre l'avion leader et l'avion suiveur quand l'avion leader se pose sur la piste, à l'instant  $t_{L0}$  ;

$\mu_F$  est la différence moyenne en temps entre l'avion leader et l'avion suiveur quand le suiveur entame l'approche finale ;  $t_{F0}$  est l'instant d'atterrissage du suiveur ;

$t_{LX}$  est l'instant quand le leader dégage la piste ;

$R_{A_i}$  est le temps d'occupation de piste de l'avion  $i$  ;

$X_F(t)$  est la position du suiveur à l'instant  $t$  ;

$X_L(t)$  est la position du leader à l'instant  $t$  ;

$V_F$  est la vitesse d'approche du suiveur ;

$V_L$  est la vitesse d'approche du leader ;

$W$  la variation de la vitesse du vent ;

$S$  la distance entre le leader et le suiveur à l'instant  $t_{L0}$  ;

$D$  la position du leader à l'instant  $t_{L0}$ .

Le modèle traite deux cas pour l'étude des arrivées :

- Celui où la vitesse d'approche du leader est inférieure ou égale à la vitesse de l'avion suiveur. Dans ce cas il faudra satisfaire la contrainte :

$$D - X_F(t_{L0}) \geq S$$

- Celui où la vitesse d'approche du leader est supérieure à celle du suiveur. Dans ce cas il faudra satisfaire la contrainte :

$$X_L(\mu_F) - X_F(\mu_F) \geq S.$$

Le modèle tient compte des aléas dus aux erreurs de position et à l'influence des variations de vitesse du vent. Compte tenu de ces incertitudes, le modèle recherche les conditions d'espacement qui font que les contraintes de séparation soient satisfaites avec une probabilité de 95%.

**Etude du premier cas :**  $V_F \geq V_L$

La position du leader à l'instant  $t$ ,  $X_L(t)$ , est :

$$X_L(t) = \delta X_L + (V_L + \delta V_L + \delta W)t$$

et la position du suiveur,  $X_F(t)$  est :

$$X_F(t) = \delta X_F + (V_F + \delta V_F + \delta W)(t - \mu_A)$$

Le leader se pose à l'instant  $t_{L0}$  :

$$t_{L0} = \frac{D - \delta X_L}{V_L + \delta V_L + \delta W}$$

Le suiveur se trouve alors à la position  $X_F(t_{L0})$  :

$$X_F(t_{L0}) = \delta X_F + (V_F + \delta V_F + \delta W) \left( \frac{D - \delta X_L}{V_L + \delta V_L + \delta W} - \mu_A \right).$$

Si on suppose que toutes les perturbations sont du premier ordre alors l'équation précédente devient :

$$X_F(t_{L0}) = \delta X_F + \frac{DV_F}{V_L} \left( 1 + \frac{\delta V_F + \delta W}{V_F} - \frac{\delta X_L}{D} - \frac{\delta V_L + \delta W_L}{V_L} \right) - \mu V_F \left( 1 + \frac{\delta V_F + \delta W}{V_F} \right).$$

Dans cette approximation linéaire  $X_F(t_{L0})$  est une variable aléatoire de moyenne :

$$\frac{DV_F}{V_L} - \mu V_F$$

et de variance :

$$\sigma_1^2 = \frac{D^2 V_F^2}{V_L^2} \left( \frac{\sigma_{V_F}^2 + \sigma_W^2}{V_F^2} + \frac{\sigma_{X_L}^2}{D^2} + \frac{\sigma_{V_L}^2 + \sigma_{W_L}^2}{V_L^2} \right) + \mu^2 V_F^2 \frac{\sigma_{V_F}^2 + \sigma_W^2}{V_F^2} + \sigma_{X_F}^2.$$

La contrainte  $D - X_F(t_{L0}) \geq S$  doit être ici satisfaite avec une probabilité de 95%. Elle peut être réécrite comme :

$$\mu_A \geq \frac{D}{V_L} - \frac{D-S}{V_F} + \frac{1,65\sigma_1}{V_F}.$$

Une autre contrainte de séparation s'impose à l'instant  $t_{F0}$  de l'atterrissage de suiveur :

$$t_{F0} - t_{LX} > 0,$$

le suiveur devant atterrir à l'instant  $t_{F0}$ , on a:

$$t_{F0} = \frac{D - \delta X_F}{V_F + \delta V_F + \delta W} + \mu_A.$$

La contrainte de séparation devrait être satisfaite avec une probabilité de 98,7% ce qui conduit à la condition :

$$\mu_A \geq \frac{D}{V_L} - \frac{D}{V_F} + R_{A_L} + 2,215\sigma_2,$$

$$\text{où } \sigma_2^2 = \frac{D^2}{V_F^2} \left( \frac{\sigma_{X_F}^2}{D^2} + \frac{\sigma_{V_F}^2 + \sigma_W^2}{V_F^2} \right) + \frac{D^2}{V_L^2} \left( \frac{\sigma_{X_F}^2}{D^2} + \frac{\sigma_{V_L}^2 + \sigma_{W_L}^2}{V_L^2} \right) + \sigma_{R_{A_L}}^2.$$

### Etude du deuxième cas : $V_F < V_L$

Dans ce cas le suiveur peut entamer l'approche finale avant que le leader n'atterrisse. La variable aléatoire  $X_L(\mu_F) - X_F(\mu_F)$ , a une distribution normale, de moyenne  $V_L \mu$  et de variance :  $\sigma_3^2 = \mu^2 (\sigma_{V_L}^2 + \sigma_W^2) + \sigma_{X_F}^2 + \sigma_{X_L}^2$ .

La contrainte de séparation est satisfaite avec une probabilité de 95% si :

$$\mu_F \geq \frac{S}{V_L} + 1,65 \frac{\sigma_3}{V_L}.$$

On peut mettre à profit les résultats précédents pour le cas où des opérations de départs sont insérées entre deux arrivées successives. Dans ce cas le temps d'occupation de piste  $R_{A_L}$  est remplacé par  $R_{A_L} + R_{D_F}$ , où  $R_{D_F}$  est le temps d'occupation de piste par l'avion qui part. Si on tient compte des délais de communication avec la tour de contrôle  $c$ , la relation précédente deviendrait :  $R_{A_L} + c + R_{D_F}$ .

Le modèle traite deux cas pour l'étude des décollages :

- Celui où la vitesse du leader est inférieure ou égale à la vitesse de l'avion suiveur, dans ce cas il faudra satisfaire la contrainte :

$$D_D - X_F(t) \geq S_D$$

- Celui où la vitesse du leader est supérieure à celle du suiveur, dans ce cas il faudra satisfaire la contrainte :

$$D_D \geq S_D.$$

$D_D$  est la longueur du tronçon commun de la montée initiale et  $S_D$  est la séparation minimum en distance entre les départs.

Dans le premier cas  $V_{D_F} \geq V_{D_L}$ , la contrainte de séparation sera satisfaite à 95% si :

$$\mu_D \geq \frac{D_D}{V_{D_L}} + \frac{1}{2}(R_{D_L} - R_{D_F}) - \frac{D_D - S_D}{V_{D_F}} - c + \frac{1,65}{V_{D_F}} \sigma_4,$$

où

$$\sigma_4^2 = \left( \frac{D_D}{V_{D_L}} + \frac{R_{D_L} - R_{D_F}}{2} - \mu - c \right)^2 (\sigma_{V_{D_F}}^2 + \sigma_W^2) + \frac{V_{D_F}^2 D_D^2 + \sigma_{V_{D_L}}^2 + \sigma_W^2}{V_{D_L}^2} + \frac{V_{D_F}^2}{4} (\sigma_{R_{D_L}}^2 + \sigma_{R_{D_F}}^2 + 4\sigma_c^2)$$

Dans le deuxième cas  $V_{D_F} < V_{D_L}$ , la contrainte de séparation s'écrit :

$$\mu_D = \max\{\min\{\mu_{D_1}, \mu_{D_2}\}, \mu_{D_3}\},$$

où

$$\mu_{D_1} \geq \frac{R_{D_L}}{2} + \left( \frac{V_{D_F}}{2V_{D_L}} - 1 \right) - c + \frac{S_D}{V_{D_L}} + 1,65\sigma_5,$$

$$\sigma_5^2 = \left( \mu + c + R_{D_F} - \frac{R_{D_L}}{2} \right)^2 \frac{\sigma_{V_{D_L}}^2 + \sigma_W^2}{V_{D_L}^2} + \left( 1 - \frac{V_{D_F}}{2V_{D_L}} \right)^2 \sigma_{R_{D_F}}^2 + \frac{\sigma_{R_{D_L}}^2}{4} + R_{D_F}^2 \frac{\sigma_{V_{D_F}}^2 + \sigma_W^2}{4V_{D_L}^2} + \sigma_c^2,$$

$$\mu_{D_2} \geq \frac{D_D}{V_{D_L}} + \frac{R_{D_L}}{2} - R_{D_F} - c + 1,65\sigma_6,$$

$$\sigma_6^2 = \sigma_{R_{D_F}}^2 + \frac{D_D^2(\sigma_{V_{D_L}}^2 + \sigma_W^2)}{V_{D_L}^4} + \frac{\sigma_{R_{D_L}}^2}{4} + \sigma_c^2,$$

$$\mu_{D_3} \geq R_{D_L} - c + 2,215\sigma_7,$$

$$\sigma_7^2 = \sigma_{R_{D_L}}^2 + \sigma_c^2.$$

### V.2.3 Calcul de la capacité par ASAC

Afin de procéder au calcul de la capacité, les paramètres  $\mu_{ij}$ , le temps moyen entre deux opérations et  $\sigma_{ij}$ , l'écart type du temps inter-opérations, où le premier avion est de type  $i$  et le deuxième est de type  $j$ , sont définis. La fonction de distribution des temps inter opérations  $N(t, \mu, \sigma)$ , est supposée suivre une loi normale. Le temps moyen entre deux arrivées est alors donné par :

$$p_{AA}(t) = \sum_i \sum_j p_i p_j N(t, \mu_{ij}, \sigma_{ij}),$$

où  $p_i$  est la proportion d'avions de type  $i$  dans le flot des arrivants .

L'estimation du nombre d'arrivées sur la piste pendant une heure est alors donnée par l'expression :

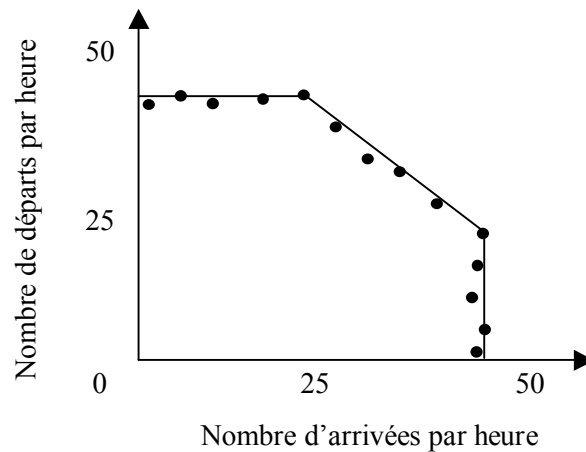
$$M = \frac{60}{\sum_i \sum_j p_i p_j \mu_{ij}}.$$

Cette formule donne la valeur de la capacité associée à la situation où on considère uniquement des arrivées. Les départs seront alors insérées dans le flux des arrivées de manière aléatoire. La fonction de distribution du temps disponible pour effectuer cette insertion est donnée par :

$$p(t - R_A - R_D - c) = \sum_i \sum_j p_i p_j N(\mu_{ij} - \mu_{R_A} - \mu_{R_D} - \mu_c, \sqrt{\sigma_{ij}^2 + \sigma_{R_A}^2 + \sigma_{R_D}^2 + \sigma_c^2}).$$

En augmentant progressivement le nombre de départs on obtient une série de points qui décrivent la courbe de capacité.





**Figure V.1 Exemple de courbe de capacité**

On obtient ainsi une enveloppe de la courbe de capacité. Cette enveloppe est caractéristique des frontières Pareto pour chaque piste, puis pour chaque groupe de pistes. L'évaluation de la capacité de la plate-forme aéroportuaire est alors obtenue par la combinaison des frontières Pareto associées aux différentes configurations de la plate-forme aéroportuaire.

#### V.2.4 Analyse du modèle ASAC

Ce modèle propose donc une approche assez complète de l'estimation de la capacité d'une piste, donnant une grande importance à la représentation des conditions de l'approche finale pour l'atterrissage. Il présente quelques limitations importantes :

- il suppose une maîtrise importante des flux à l'arrivée et au départ,
- il demande le calcul des nombreux paramètres statistiques,
- il suppose que l'état probabiliste du système est stationnaire,
- il ne tient pas compte des phénomènes dynamiques tels que la formation des files d'attente et leur résorption,
- il ne tient pas compte de façon explicite des couplages entre flux arrivant ou décollant de pistes différentes,
- les différents paramètres associés aux conditions météorologiques, à la gestion du trafic ou aux équipements disponibles ne sont pas pris en compte de façon explicite. Leur effet est donc difficile à être analysé par ce type de modèle.

Ainsi ce modèle de capacité ne peut avoir qu'un caractère indicatif, il sera difficile de l'utiliser pour évaluer l'influence de tel ou tel paramètres ou de telle ou telle modification d'une procédure opérationnelle sur la capacité du système de pistes.

On peut ainsi considérer qu'avec ce modèle, on atteint la limite de ce que la théorie peut apporter pour évaluer la capacité d'un système de pistes.

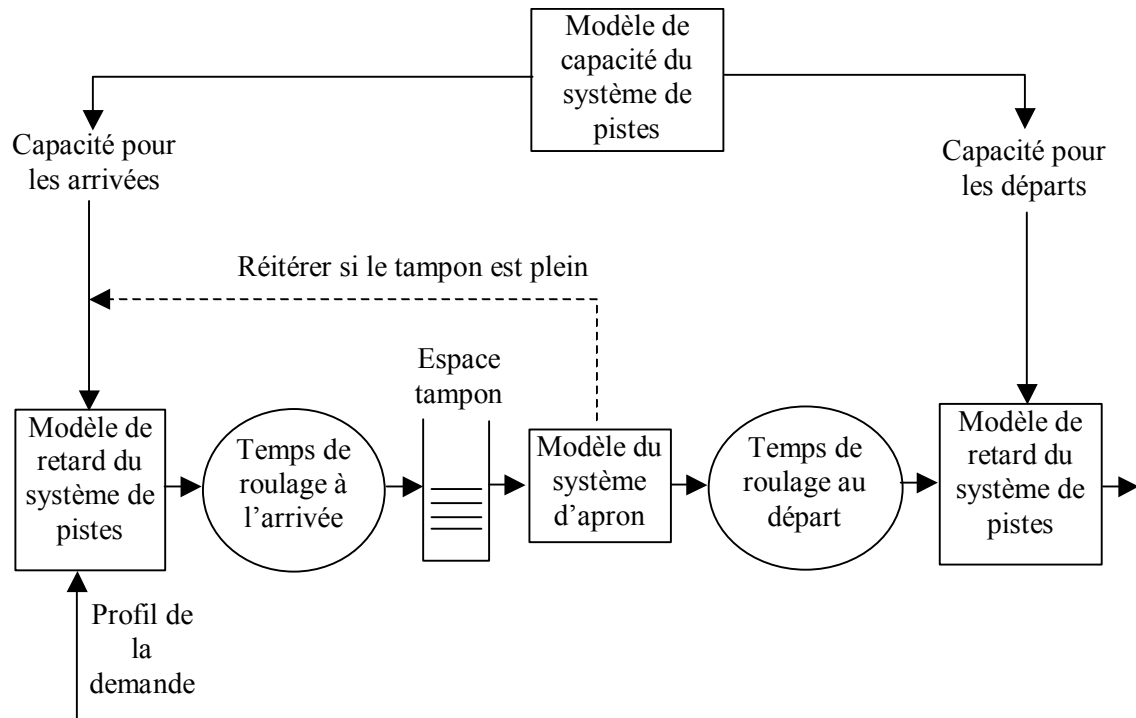
### **V.3 Evaluation de la capacité par la simulation**

Une autre approche de l'évaluation de la capacité est possible en essayant de modéliser directement les processus physiques mis en jeu, notamment avec leurs aléas et leur caractère non stationnaire. Suivant le degré de détail avec lequel les flux d'aéronefs sont appréhendés par les modèles de simulation, on discernera des modèles de type macroscopique, mésoscopique ou microscopique.

#### **V.3.1 Approches macroscopiques**

La modélisation macroscopiques des plate-formes aéroportuaires conduit à un modèle global de l'aéroport tout en gardant une formulation mathématique assez compacte. Le principal objectif est d'évaluer grossièrement la capacité et l'impact sur le niveau de service des diverses configurations et aménagements possibles de l'infrastructure aéroportuaire. Ses principaux utilisateurs sont les autorités aéroportuaires chargées de la planification du développement de la plate-forme aéroportuaire.

L'un des modèles macroscopique des plus connus est MACAD [Andreatta et al., 1998] qui est destiné à assister les gestionnaires d'aéroports dans l'optimisation de la capacité aéroportuaire (« côté piste ») étant donné un niveau de demande et un niveau de service désiré. Le niveau de service des avions est représenté par le retard aux avions généré sur la plate-forme aéroportuaire. La plate-forme est modélisée comme un réseau de postes d'arrivée, voies de circulation à l'arrivée, zone de stationnement, voies de circulation au départ, pistes de décollage. Chacun de ces modules est représenté de façon analytique et probabiliste.

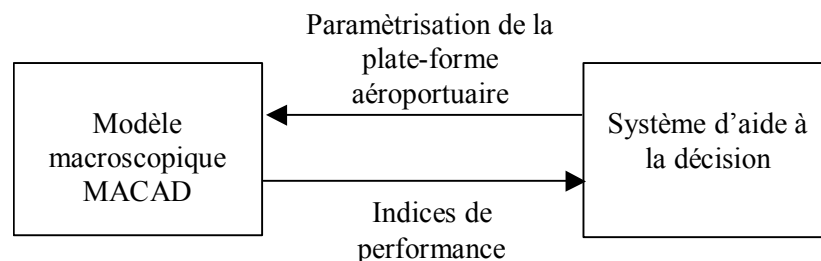


**Figure V.2 Composition du modèle de simulation MACAD**

MACAD est couplé à un système d'aide à la décision qui fournit un environnement intégré pour assister le gestionnaire de la plate-forme aéroportuaire, il permet de modifier les paramètres caractérisant la demande, la géométrie de l'aéroport, le système de contrôle de trafic aérien avoisinant, les opérations au sol des avions et les conditions météorologiques.

Ce système d'aide à la décision génère de façon probabiliste des scénarios qui sont évalués et qui fournissent des éléments relatifs à la capacité.

Ce modèle macroscopique a connu des améliorations successives qui ont été validées pour le cas de l'aéroport de Rome Fiumicino.



**Figure V.3 Système décisionnel associé à MACAD**

Ce modèle, par son degré de détail insuffisant et par son incapacité à prendre en compte de façon réaliste les interactions existantes entre les différents postes de service des avions, est

donc peu adapté à l'étude de l'influence du système de gestion des flux d'avions sur la capacité de la plate-forme aéroportuaire. Il peut, néanmoins, être un outil de diagnostic global préliminaire à une étude plus fine et plus lourde en terme de moyens de traitement numérique à mettre en œuvre.

### **V.3.2 Approches microscopiques**

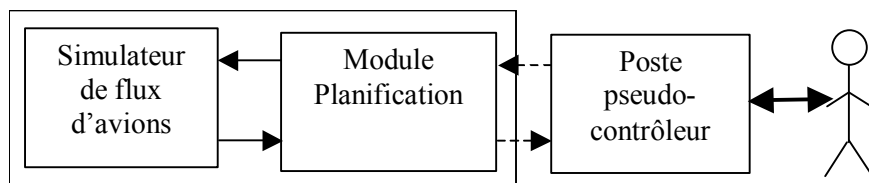
L'approche la plus naturelle pour évaluer la capacité d'un système aéroportuaire est d'avoir une représentation topologique de l'infrastructure de la plate-forme et de simuler l'évolution du trafic représenté de façon microscopique sur cette infrastructure.

La possibilité de simuler de façon détaillée les mouvements des avions sur les voies de circulation et les pistes de l'aéroport fournit un environnement adéquat pour tester des nouvelles dispositions relatives à la gestion du trafic des avions sur la plate-forme aéroportuaire. Ceci peut permettre d'étudier différentes mesures envisagées pour la gestion du trafic au sol des aéronefs, telles que :

- l'effet de l'insertion des départs dans le flux de trafic arrivant ;
- l'efficacité des stratégies de gestion des temps de départ des postes ;
- l'efficacité des stratégies de gestion de la congestion du système composé des pistes et des voies de circulation ;
- la génération de cheminements pour les départs et les arrivées.

L'un des modèles microscopiques de trafic au sol des aéronefs, GMS (Ground Movement Simulator), décrit dans [Mathaisel et Idris, 1998] simule de façon très détaillée les opérations de trafic aérien en temps réel pour toutes les étapes de vol, du décollage à l'atterrissage, aussi bien que toutes les phases du mouvement au sol de l'avion comprenant le roulage à l'atterrissage, le roulage au sol, les arrêts, la poursuite éventuelle de leader (leader following), l'entrée au poste, le recul du poste, et le décollage. Il fournit des représentations graphiques très détaillées de ces activités. Ce simulateur est à base d'événements discrets pour une granularité de 1 seconde, ce qui permet de reproduire de façon très fine les opérations. Néanmoins, comme d'autres simulateurs de trafic, celui-ci ignore le trafic des véhicules de service sur la plate-forme aéroportuaire.

Ce système peut être utilisé comme un simple simulateur de trafic pour lequel on a prédéterminé un scénario de trafic et la gestion de celui-ci est exécutée par un module de séquençement (le Scheduler). Dans ce cas, une approche de type Monte Carlo permettra de générer suffisamment de données pour chaque situation de trafic de façon à explorer de proche en proche la capacité pratique d'un aéroport. Néanmoins, ce processus semble être très lourd. Par ailleurs, ce système peut être aussi interfacé avec des pseudo-postes de contrôle de trafic au sol, ce qui permet d'évaluer dans un environnement réaliste, différents scénarios de trafic et de tester différentes politiques de contrôle de celui-ci. Dans ce cas les paramètres du superviseur sont imposés par les pseudo-postes de contrôle.



**Figure V.4 La structure générale de GMS**

Ainsi GMS apparaît plutôt comme un outil d'évaluation des politiques de gestion du trafic sol au niveau tactique, voire temps réel, plutôt que comme un outil de gestion du trafic à un niveau plus stratégique, niveau associé à la notion de capacité.

L'un des simulateurs microscopiques des plus utilisés dans le domaine aéroportuaire est SIMMOD (Simulation Model) [SIMMOD]. Il peut représenter aussi bien le trafic aérien que le trafic sol. En ce qui concerne la partie sol, SIMMOD représente l'infrastructure de l'aéroport au niveau topologique. La demande de trafic peut provenir de données historiques ou être générée de façon aléatoire. Le simulateur doit disposer de beaucoup d'informations concernant l'aéroport : la longueur des voies, les types d'avions qui peuvent l'emprunter, le nombre maximum d'avions sur une voie de circulation, la direction de circulation, la vitesse de roulage. SIMMOD étant un simulateur opérant par traitement séquentiel d'événement discrets, il est capable de représenter de nombreux phénomènes dynamiques (formation ou élimination de files d'attente, conflits de trafic).

SIMMOD a un module de calcul d'itinéraires optimaux entre pistes et postes de stationnement. Ne mettant en œuvre aucune stratégie particulière de contrôle du trafic, en cas

de conflit une règle de priorité de type FCFS est appliquée. SIMMOD est utilisé pour évaluer des nouvelles procédures de circulation ou l'impact des nouvelles infrastructures (voies de circulation, pistes, postes) sur la fluidité du trafic. Le coût de mise en œuvre d'une étude basée sur ce modèle est considérable car la quantité de données nécessaires pour obtenir des résultats significatifs est très importante.

Néanmoins, SIMMOD connaît un succès considérable, qui semble être dû au réalisme de sa représentation directement accessible non seulement aux décideurs, mais aussi aux opérateurs. Ainsi, SIMMOD devient un outil de dialogue entre les différents agents impliqués dans les activités aéroportuaires (gestionnaires, opérateurs, contrôleurs) qui permet d'évaluer en commun des scénarios particuliers.



**Figure V.5** Capture d'écran de SIMMOD – représentation de l'infrastructure aéroportuaire

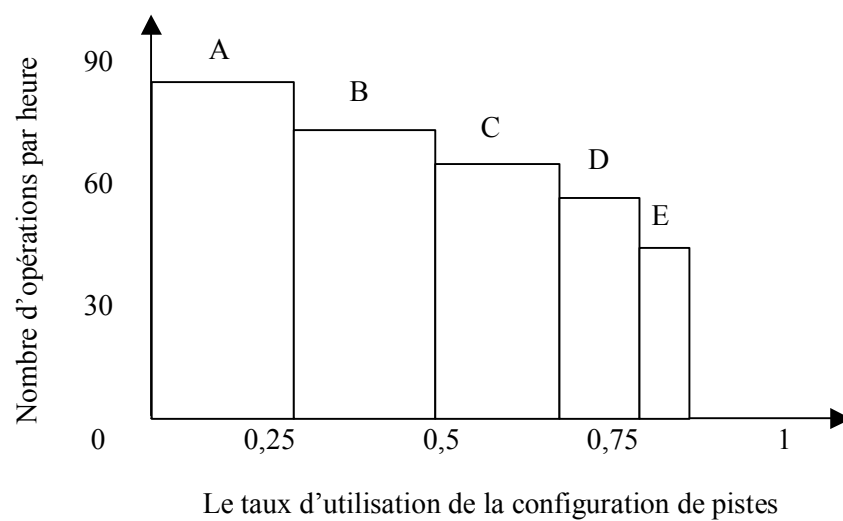
Des communautés d'utilisateurs, tels que le ESUG (European SIMMOD User Group) se sont constituées et entretiennent des forums de discussion, centrés sur l'utilisation de cet outil.

### V.3.3 Approches mésoscopiques

Les modèles mésoscopiques proposent un niveau de détail intermédiaire entre les modèles macroscopiques et les modèles microscopiques. Ainsi, si d'un côté ils proposent un niveau de

détail beaucoup plus grand que dans les modèles macroscopiques, leur mise en œuvre est bien moins lourde que dans le cas des modèles microscopiques.

La plupart de ces modèles mettent en œuvre des systèmes de files d'attente. C'est le cas par exemple dans [Aaron, 1990] qui représente la dynamique des différents files d'attente par des processus Markoviens conduisant à l'évaluation de l'attente moyenne dans les différentes files. Les paramètres de ces processus dépendant des conditions opérationnelles, il est possible d'associer à chacune d'entre elles un niveau de capacité pratique. Ceci conduit alors à établir des « cartes de capacité » telle celle représentée sur la figure V.6.



**Figure V.6 La carte de capacité d'un système de pistes**

Sur cette figure, A correspond à une opération de jour par beau temps, et de B à E les conditions opérationnelles sont dégradées progressivement (visibilité, vent).

Un autre exemple de modèle mésoscopique a été proposé dans [Pujet et al., 1999]. Ce modèle est destiné au départ à évaluer l'effet des mesures de gestion du trafic destinées à éliminer la congestion du trafic de départ sur l'aéroport. L'impact potentiel de ces stratégies de contrôle sur les coûts directs d'exploitation, les coûts environnementaux et les retards peut être évalué par ce modèle.

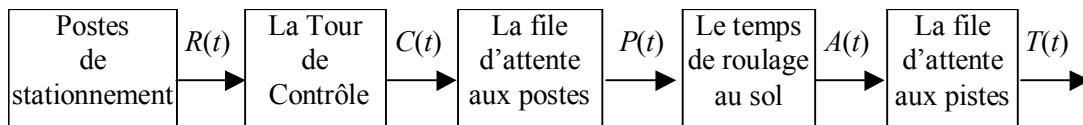
Ici aussi le système aéroportuaire et le système de pistes sont modélisés en tant que serveurs de files d'attente, et une distribution probabiliste est calculée pour la durée des déplacements dans le système de voies de circulation de la zone de stationnement à la file d'attente de

l'entrée de la piste. Ce modèle capture le processus de départ avec suffisamment de détails pour pouvoir estimer l'efficacité de la politique de gestion des départs mise en œuvre.

Ce modèle mésoscopique de l'aéroport prend en compte des paramètres tels que les configurations de piste et les dimensions des zones de stationnement. Pour chaque configuration de piste, les paramètres suivants ont été calibrés, en utilisant une année de données historiques : la distribution de temps de parcours des zones de stationnement aux pistes de départ et le taux de service de piste de départ. Pour chaque configuration de piste, les paramètres suivants de sortie ont été validés, en utilisant une année différente pour les données : la distribution du nombre des avions sur les voies de circulation, les distributions des temps de roulage au sol dans des conditions de trafic léger, modéré et dense, la distribution du taux réel de départs.

La réduction des délais d'attente en bout de piste peut se traduire en réduction des coûts d'exploitation et des émissions directes de polluants. La demande de départ employée pour examiner les stratégies de contrôle de départs est la demande historique afin de mieux représenter les « oscillations d'horaire » (e.g. beaucoup de vols sont programmés aux heures rondes pour des raisons de vente mais ils partent en fait à un horaire différent prévu normalement par la compagnie aérienne).

La structure de ce modèle est représentée sur la figure V.7 :



**Figure V.7 Exemple de structure séquentielle pour un modèle mésoscopique de trafic aéroportuaire**

L'évolution de l'état du système est représentée sur une base temporelle discrète de pas de temps d'une minute. Les notations suivantes sont utilisées :

$R(t)$  est le nombre de demandes de repoussages pendant la période  $[t, t+1[$  ;

$C(t)$  est le nombre d'avions qui ont la « clearance » de repoussage donnée par les contrôleurs de tour de l'aéroport pendant la période de temps  $[t, t+1[$  ;

$GQ(t)$  est le nombre d'avions auxquels la clearance a été donnée par les contrôleurs de trafic, ou avant la période  $t$  mais qui sont retenus à la porte vers la fin de la période  $[t, t+1[$  ;

$P(t)$  est le nombre de repoussages ayant lieu réellement pendant la période  $[t, t+1[$  ;

$N(t)$  est le nombre d'avions partant sur les voies de circulation au début de la période  $[t, t+1[$  ;



$A(t)$  est le nombre d'avions atteignant la file d'attente de piste pendant la période  $[t, t+1[$  ;

$RQ(t)$  est le nombre d'avions attendant dans la file d'attente de départ sur les voies de circulation (il faut noter que cette file d'attente peut dans certains cas être partagée entre plusieurs pistes de départ) ;

$RC(t)$  est la capacité des pistes de départ pendant la période  $[t, t+1[$  ;

$T(t)$  est le nombre de décollages pendant la période  $[t, t+1[$ .

La capacité de la circulation au départ,  $C(t)$ , résultant de l'activité de contrôle, tient compte du trafic courant au sol, de la demande courante  $R(t)$ , de la prévision de la demande et de la capacité de départ. Le modèle suppose que le repoussage survient juste après la réception de la clearance, de sorte que :

$$P(t) = C(t).$$

Les arrivées dans la file d'attente de piste  $A(t)$  sont liées au repoussage  $P(t)$  par les temps de parcours de la façon suivante:

$$A(t) = \sum_{\tau \geq 0} \left( \sum_{k=1}^{P(t-\tau)} U(t-\tau, k, \tau) \right)$$

où  $U(t-\tau, k, \tau)$  est une variable aléatoire qui prend la valeur 1 si le  $k^{ème}$  avion repoussé à l'instant  $t-\tau$  met un temps  $\tau$  pour aller jusqu'à la file d'attente en tête de piste.

L'évolution de la file d'attente en tête de piste est donnée par :

$$RQ(t) = RQ(t-1) + A(t) - T(t)$$

Les décollages sont limités à la capacité de la piste  $RC(t)$  par le nombre d'avions dans la file d'attente  $RQ(t)$  :

$$T(t) = \min(RQ(t-1) + A(t), RC(t)),$$

Le niveau de trafic  $N(t)$  sur les voies de circulation est donné par :

$$N(t) = N(t-1) + P(t-1) - T(t-1),$$

Le niveau de trafic sur la zone de stationnement est donné par :

$$GQ(t) = GQ(t-1) + C(t) - P(t).$$

Le nombre d'avions  $P(t)$  quittant la file d'attente de la zone de stationnement ou recevant la clearance pour le repoussage pendant la période  $[t, t+1[$  est donné par un algorithme spécifique.

La dispersion des temps de roulage au sol résulte des plusieurs facteurs : variabilité de la durée du repoussage réel et du démarrage de moteur, variabilité des durées des manœuvres avion, la vitesse de roulage pouvant être affectée par la visibilité et dépendent du type d'avion. Par ailleurs, les avions pour certaines destinations reçoivent leurs informations de vol plus tard que d'autres et mettent un temps plus grand pour entrer dans la file d'attente de la piste. Des distributions de probabilité de type Gaussien sont adaptées aux distributions observées pour obtenir un modèle des temps de parcours pour des valeurs petites de  $N$ . Une évaluation simple du temps de roulage est donnée par :

$$\tau = \tau_{roulage} + \tau_{attente}$$

où,  $\tau_{roulage}$  est le temps de parcours suivant les distributions du trafic décrites ci-dessus et  $\tau_{attente}$  est la durée de l'attente en tête de piste. Ce modèle surestime légèrement le temps de roulage au sol quand  $N$  est grand, parce qu'il ne tient pas compte du fait que la file d'attente de piste croissant le  $\tau_{attente}$  de temps de parcours pour atteindre la piste diminue avec la distance à parcourir.

L'approche adoptée pour valider ce type de modèle est d'identifier des périodes où la file d'attente de piste est peu susceptible d'être vide, et de considérer que l'histogramme des décollages évalués sur ces périodes est une bonne approximation de la distribution théorique du taux de service des pistes de départ. Cette approche serait facile à appliquer si on pouvait directement observer la longueur des files d'attente en tête de piste  $RQ(t)$ . Le nombre  $N(t)$  des avions prêts à décoller qui se trouvent sur les voies de circulation peut être employé à sa place. La valeur de  $N(t)$  est en effet un bon indicateur du chargement de la piste de départ juste après l'instant  $t$ . Soit  $\tilde{T}_n(t)$ , « la moyenne mobile » du taux de décollage au cours des périodes de temps  $(t-n, \dots, t, \dots, t+n)$ . A mesure que  $N$  augmente, le taux de décollage augmente d'abord. Le modèle de système de piste de départ utilisé étant basé sur le concept d'absence de serveur, à chaque période, il y a une probabilité  $p$  pour que le système de piste ne soit pas disponible pour le décollage. Si le système de piste est cependant disponible, sa capacité est de  $c$  avions pour une période de temps. Dans [Drake, 1967] est montré que la capacité de piste est le résultat d'un processus de Bernoulli (avec succès si le système de piste est disponible pour le décollage). La capacité de départ  $\tilde{T}_n(t)$  suit alors théoriquement la distribution binomiale :

$$\Pr\left(\tilde{T}_n(t) = \frac{kc}{2n+1}\right) = \binom{2n+1}{k} (1-p)^k p^{(2n+1)-k} \text{ avec } 0 \leq k \leq 2n+1,$$

Les paramètres  $p$  et  $c$  de ce modèle sont choisis de sorte que la distribution de probabilité corresponde à l'histogramme observé de  $\tilde{T}_5(t+6)$  pour  $N(t)$  grand. Une réalisation sur ordinateur de ce modèle a permis de le valider avec des données historiques.

Ce modèle peut être employé pour évaluer les retards dans les files d'attente et examiner des méthodes de réduction ces retards. Il fournit des estimations du nombre d'avions attendant dans des files d'attente de piste ( $RQ(t)$ ), et du temps d'attente pour les avions dans la file d'attente de piste ( $\tau_{attente}$ ). Ceci permet donc de déterminer indirectement la capacité du système.

Une modélisation similaire a été employée par [Shumsky, 1997] pour développer des modèles déterministes d'estimation des temps de décollage des vols dans les grands aéroports. Shumsky [ibidem] a observé l'existence d'une corrélation entre le niveau de congestion du trafic aéroportuaire et le taux des départs. Ceci pourrait être une base pour l'élaboration d'une stratégie de contrôle des flux de départs.

La modélisation mésoscopique a été également utilisée par Herbert [Herber et Dietz, 1997], qui a modélisé la demande au départ par un processus non homogène de type Poisson, les temps de roulage au sol étant pris comme la somme d'un temps nominal de parcours jusqu'à la file d'attente de la piste et du temps de service de la piste. La piste est modélisée comme un processus de Markov itératif dans lequel le temps de service suit une distribution d'Erlang-6. Le serveur de piste peut également être absent après un départ, et la distribution de temps d'arrêts est Erlang-9.

Ainsi les modèles mésoscopiques, qui par certains aspects (utilisation de la théorie des processus stochastiques), se rapprochent des modèles analytiques, ne conduisent que de façon indirecte et plutôt opaque à l'évaluation de la capacité aéroportuaire.

## V.4 Evaluation de la capacité par l'optimisation

La notion de capacité étant liée à celle d'utilisation efficace, voir optimale, des moyens mis à disposition, une approche basée sur la notion d'optimisation semble naturelle ici.

### V.4.1 Le principe mis en œuvre

Différentes approches d'évaluation de la capacité aéroportuaire par l'optimisation ont déjà été proposées [Gilbo, 1991], [Gilbo, 1993], [Gilbo et Howard, 2000]. Ces approches sont basées sur l'utilisation d'un modèle mathématique des flux d'arrivée et de départ des avions sur l'aéroport considéré. La fonction de ce modèle est de préciser le domaine d'admissibilité de ces flux en explicitant les contraintes opérationnelles auxquels ils sont soumis. Une fois ce domaine d'admissibilité établi, il s'agit d'explorer ses limites et bien sûr dans le sens de l'efficacité. Pour cela plusieurs possibilités existent :

- Identifier la frontière de Pareto en ce qui concerne les flux globaux d'arrivées et de départs. On affronte alors un problème d'optimisation bi-critère soumis à un ensemble de contraintes mathématiques (notons les  $\{c_1, c_2, \dots, c_N\}$ ) qui sur le plan numérique peut aisément se ramener à un problème d'optimisation mono-critère dont la solution pour différents niveaux de flux d'arrivée conduit à construire de proche en proche cette frontière de Pareto.

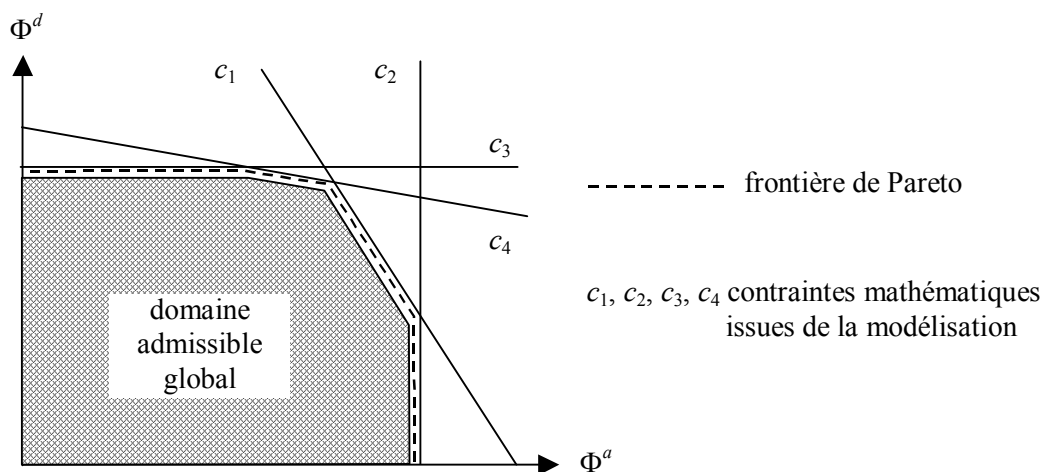


Figure V.8 Evaluation de la capacité par identification de la frontière de Pareto

- Choisir une mesure de performance et définir un seuil critique pour celle-ci. Il s'agira donc suivant sa nature de maximiser ou de minimiser celle-ci. Parmi les mesures de performance adoptées, on peut par exemple citer celles qui prennent en compte : les longueurs des files d'attente, les retards moyens à l'arrivée et au départ. On aura donc un schéma d'optimisation tel que :

$$\min_{\Phi} f(\Phi)$$

sous

$$\Phi \in \mathcal{A}(\underline{D}, \underline{P})$$

où  $f(\Phi)$  est la mesure de performance adoptée que l'on désire ici minimiser,  $\Phi$  est l'ensemble des flux de trafic avion,  $\mathcal{A}(\underline{D}, \underline{P})$  est le domaine admissible des flux, celui-ci dépend des niveaux de demande  $\underline{D}$  et est paramétré par  $\underline{P}$  qui représente les différents éléments caractérisant les moyens tactiques mis en œuvre au niveau de la circulation des avions et de sa gestion.

### V.4.2 Exemple d'approche d'optimisation

Différents modèles d'estimation de la capacité aéroportuaire suivant une approche d'optimisation ont été développés durant les deux dernières décennies. Aux Etats-Unis, sous l'impulsion de la FAA (Federal Aviation Administration), plusieurs de ces modèles ont été conçus. On considère ici le modèle développé par Gilbo [Gilbo, 1993] qui est largement représentatif de ceux-ci. Dans ce modèle, on suppose connues les courbes de capacité associées à chaque piste en opération. Cette capacité est donnée par  $\phi_i(u)$  où  $u$  est le nombre d'avions à l'arrivée pendant le créneau  $i$  (durée de 15 minutes) et  $\phi_i(u)$  est le nombre maximum d'avions au départ que l'on peut insérer dans ce trafic incident. L'optimisation de la capacité aéroportuaire consiste alors à affecter au mieux les capacités des pistes de façon à satisfaire la demande sur une période de temps donnée pour des conditions opérationnelles bien définies.

Le critère qui a été retenu dans ce modèle est celui de la minimisation d'une fonction croissante du nombre total d'avions présent dans les files d'attente sur la période considérée. La dynamique des flux de trafic avion est représentée sur la base de l'échelle temporelle des créneaux (15 minutes), ceci conduit à une forte simplification du modèle qui ne peut pas

représenter certains phénomènes dynamiques, notamment l'évolution du trafic le long des voies de circulation au sol.

Les notations suivantes sont employées pour formuler le problème d'optimisation :

$T$  est l'horizon d'optimisation considéré, composé de  $N$  slots de durée  $\Delta$  (e.g.  $\Delta=15\text{min}$ );  $T = N\Delta$  ;

$I=\{1, 2, \dots, N\}$ , est l'ensemble des intervalles de temps ;

$a_i$  est la demande d'arrivées pour le  $i^{\text{ème}}$  slot ;

$d_i$  est la demande de départs pour le  $i^{\text{ème}}$  slot ;

$X_i$  est la longueur de la queue des arrivées au début de le  $i^{\text{ème}}$  slot;  $i=1, 2, \dots, N+1$  ;

$Y_i$  est la longueur de la queue des départs au début de le  $i^{\text{ème}}$  slot;  $i=1, 2, \dots, N+1$  ;

$\Phi = \{\phi_1(u), \dots, \phi_N(u)\}$ , est l'ensemble de courbes de capacité pour toutes les configurations des pistes dans toutes les conditions météorologiques ;

$u_i$  est la capacité à l'arrivee allouée au  $i^{\text{ème}}$  créneau  $i \in I$  ;

$v_i$  est la capacité au départ allouée au  $i^{\text{ème}}$  créneau  $i \in I$ .

$X_i$  et  $Y_i$  sont les variables d'état qui décrivent la dynamique des files d'attente,  $u_i$  et  $v_i$  sont des variables de décision,  $i \in I$ . On introduit un vecteur de décision  $u^*=(u_1, \dots, u_N, v_1, \dots, v_N)$ .

La demande de trafic est caractérisée par la distribution des flux de demande d'arrivée et de départ,  $a_i$  et  $d_i$  respectivement, pour chaque slot ( $i=1,2,\dots,N$ ). A une configuration de piste donnée est associée une courbe de capacité  $\phi_i(u)$ , ( $i=1,2,\dots,N$ ). Le problème est de trouver la séquence d'affectation des capacités à l'arrivée et au départ ( $u_i$  et  $v_i$ ) qui satisfait au mieux la demande de trafic en résolvant le problème suivant :

$$\min_{u^*} \sum_{i=1}^N \gamma_i [\alpha_i X_{i+1}^k + (1-\alpha_i) Y_{i+1}^k] \quad (\text{V.1})$$

où  $\alpha_i$  est un paramètre à valeur comprise entre 0 et 1.  $\alpha_i$  détermine la priorité accordée aux arrivées du  $i^{\text{ème}}$  créneau sur ses départs ;  $\gamma_i$  pondère le coût relatif associé au  $i^{\text{ème}}$  créneau.

Le domaine admissible du problème d'optimisation est défini par diverses contraintes :

– Les contraintes associées à la dynamique des files d'attente :

$$X_{i+1} = \max\{0, X_i + a_i - u_i\}, i \in I \quad (\text{V.2})$$

$$Y_{i+1} = \max\{0, Y_i + d_i - v_i\}, i \in I \quad (\text{V.3})$$

– Les contraintes associées aux conditions initiales :

$$X_1 = X^{(0)} \geq 0; Y_1 = Y^{(0)} \geq 0; \quad (V.4)$$

– Les contraintes associées aux capacités élémentaires :

$$0 \leq v_i \leq \phi_i(u_i), \phi_i(u_i) \in \Phi, i \in I \quad (V.5)$$

$$0 \leq u_i \leq A_i, \quad i \in I \quad (V.6)$$

$$X_i, Y_i, u_i, v_i \quad X_i, Y_i, u_i, v_i \in \mathbf{N} \quad (V.7)$$

où  $A_i$  représente la valeur maximum de la capacité d'arrivée pour le créneau  $i \in I$ .

L'objectif est de minimiser la somme pondérée de la  $k^{\text{ème}}$  puissance de la taille totale des files d'attente à l'arrivée et au départ pendant l'horizon d'optimisation.

Les coefficients  $\gamma_i$  peuvent être utilisés pour refléter la qualité de la prédiction de trafic (demande d'arrivée et de départ) et les conditions météorologiques. En général, les créneaux éloignés dans le futur ont une prévision moins fiable, par conséquent, de plus petites valeurs de  $\gamma_i$  peuvent être assignées à ces créneaux. Ils peuvent être aussi utilisés pour privilégier un créneau en particulier : si on s'intéresse à la solution en fin d'horizon, par exemple pour vérifier la résorption d'une situation de saturation, on adoptera la pondération suivante :

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_{n-1} = 0, \gamma_n = 1$$

où  $n$  est le nombre total de créneaux considérés.

La formulation proposée pour le problème d'optimisation présente une structure séparable (même pour  $k > 1$ ) et pourrait être résolue de façon classique en utilisant la Programmation Dynamique [Bellman, 1957], [El Moudani et Mora-Camino, 2000]. Néanmoins, dans le modèle de Gilbo, on se restreint au cas où  $k=1$  de façon à effectivement minimiser une somme pondérée du nombre total d'avions en attente dans les files au départ ou à l'arrivée. Ensuite une approximation linéaire des contraintes de capacité locale (V.5) est adoptée :

$$0 \leq v_i \leq \phi_i(u_i) \rightarrow \begin{cases} 0 \leq v_i \leq D_i \\ v_i + g_{ji}u_i \leq b_{ij}, j = 1, \dots, n_i \end{cases}$$

où  $D_i$  est la capacité maximale de départ pendant le  $i^{\text{ème}}$  créneau de temps.

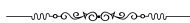
Ces deux procédés permettent alors de formuler un problème de Programmation Linéaire en nombre entiers. Néanmoins, considérant le degré requis de précision, les variables entières

sont assimilées à des variables continues dans la formulation finale du problème d'optimisation : un Programme Linéaire à variables à valeurs continues, qui peut être aisément résolu par un algorithme de type simplex [Faye et al., 1998].

Ainsi, on vérifie que la solution de ce type de problème donnera, au niveau tactique des éléments pour répartir la demande excédentaire que devraient supporter certains créneaux horaires. Le modèle ne considère pas le système de voies de circulation des avions au sol et ne prend pas en compte les problèmes de capacité résultant des normes de séparation et des conflits de trafic. Ainsi, la solution du problème d'optimisation proposé (V.1)–(V.7) n'est pas complète. Il semble donc que ce problème devrait être au moins couplé à un problème de gestion de flux de trafic au sol où la demande, par créneaux horaires, serait la solution du problème précédant  $((u_i, v_i), i \in I)$  et où les variables de décision seraient au niveau de chaque file au delà de la zone des pistes, les taux de service moyens par créneaux horaires. Dans ce cas, comme pour les files d'attente associées aux pistes, il serait possible de définir un critère d'optimisation relatif au nombre d'avions présents dans ces files d'attente. La solution de ce problème, donnerait elle des éléments au niveau tactique pour gérer le trafic au sol des avions.

## V.5 Conclusion

Si l'approche analytique ne permet pas avec une complexité suffisamment limitée, d'aborder dans le détail la distribution du trafic et son écoulement dans les voies de circulation, certaines approches de simulation microscopique permettent de le faire, mais ensuite, la recherche des conditions extrêmes d'opération, caractérisant la capacité de la plate-forme aéroportuaire, devient un problème complexe de grande ampleur compte tenu de la multitude de scénarios possibles à générer puis à explorer. Finalement, l'approche d'optimisation, compte tenu des grands progrès réalisés dans le domaine de l'optimisation (rapidité des calculateurs, nouvelles méthodes performantes exactes ou approchées), semble offrir des perspectives intéressantes dans ce domaine. C'est ce qui sera étudié dans le chapitre suivant.





# **Chapitre VI – Proposition d’une approche globale d’évaluation de la capacité aéroportuaire**

## **VI.1 Introduction**

Commençons ici par rappeler quelques éléments essentiels à l’estimation de la capacité aéroportuaire :

Le système de circulation au sol d’un aéroport présente trois composantes : les voies de circulation, le trafic et le système de contrôle. La finalité générale de ce système est d’assurer l’écoulement du trafic en minimisant les coûts d’opération tout en assurant un niveau de sécurité et de confort aux usagers. La formulation des problèmes de décision associés à la gestion et au contrôle du trafic au sol des aéronefs passe par une modélisation mathématique de ce système adaptée à la problématique qui y est considérée.

De nombreux modèles ont déjà été développés (voir chapitre précédent) pour cette fin , ceux-ci se distinguent par des caractéristiques relatives à l’horizon de temps considéré (long terme correspondant à des problèmes de dimensionnement du système, moyen terme correspondant à des problèmes opérationnels, court terme correspondant au contrôle en temps réel), au niveau de détail choisi (niveau macroscopique, mésoscopique ou microscopique pour chacune des trois composantes du système de circulation), au degré de déterminisme (et de stochasticité) adopté. Toutefois, aucun de ceux qui ont été analysés ne permet d’appréhender la capacité d’une plate-forme aéroportuaire en y intégrant de façon efficace l’effet des conditions du trafic des avions au sol.

Dans ce chapitre, on développe d’abord un modèle basé sur la théorie des graphes permettant d’obtenir une représentation suffisamment détaillée des flux de trafic des avions au sol et qui conduit à la formulation des problèmes d’optimisation aux caractéristiques (nature de la fonction objectif, nature des contraintes mathématiques et structure de l’espace admissible) adaptées à la résolution par des méthodes de programmation mathématique éprouvées par des variantes de celles-ci.

## VI.2 Modélisation du système de circulation

### VI.2.1 Les principales hypothèses du modèle

On considère une période de temps  $T$  (la demi-heure ou l’heure) pour laquelle on suppose que les conditions d’offre et de demande restent stationnaires. Les files d’attente ne sont représentées explicitement mais les capacités de stockage dans les différents éléments du système de circulation le sont. Les flux de trafic sont assimilés à des flux continus s’écoulant entre les postes de stationnement et les pistes et vice-versa. On tient compte aussi explicitement de la présence d’avions en stationnement pendant toute la période considérée.

### VI.2.2 Représentation des voies de circulation

Il est possible de représenter de façon détaillée le réseau de voies de circulation de la plateforme aéroportuaire dédié aux avions par un graphe orienté  $G=(N,U)$ , l’orientation des arcs suivant une certaine logique :

a) **Les sommets du graphe**  $N$  représentent des points de connexion de ces voies de circulation et peuvent être classifiés suivant leur fonction, certains peuvent même réaliser plusieurs fonctions :

- simple point de connexion entre la sortie d’un tronçon de voie et l’entrée sur un autre tronçon de voie,
- point de croisement entre flux de trafic concurrents, de même nature ou de nature différente,
- point de décision intermédiaire ou non pour le choix d’un itinéraire,
- point de tête de stationnement.

Les pistes comportent quelques points particuliers : la tête de piste (la position du point d’impact est variable et dépend de beaucoup de facteurs) pour les atterrissages (selon la direction du vent), un point de sortie pour les décollages, des points d’entrée sur la piste pour les décollages, des points de sortie de piste pour les atterrissages et des points de croisement de pistes.

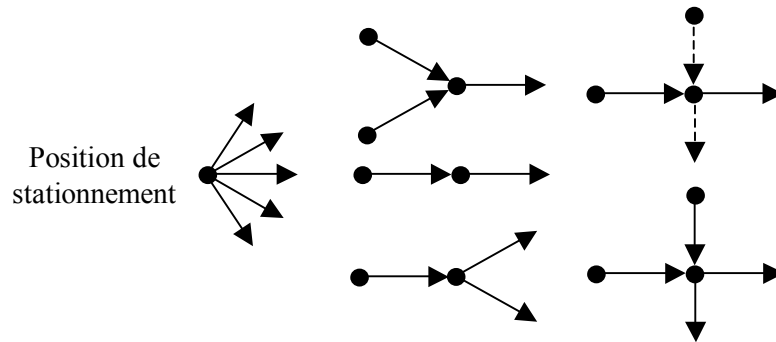


Figure VI.1 Ensemble de configurations pour les sommets du graphe

b) **Les arcs du graphe**  $U$  peuvent être classés suivant leur appartenance à l'un des cinq sous-systèmes suivantes : les pistes, les sorties de pistes, les voies de circulation, les aires de trafic, les postes de stationnement.

Certains de ces arcs peuvent avoir une double orientation en fonction du trafic, l'orientation de certains autres peut dépendre de la direction du vent. Cette orientation peut obéir à une logique de groupe (les pistes) ou à une logique isolée (arcs de connexion bidirectionnels ou arcs de stationnement). A chaque arc on peut associer différents paramètres : longueur et largeur de piste, envergure maximale admise, poids avion maximum supportable, capacité de stockage en nombre d'avions, sens de circulation, etc.

c) **La géométrie** des postes de stationnement et des intersections génère des contraintes de circulation pour les avions de grandes dimensions ou de poids élevé et leur interdira certains itinéraires. Ainsi à chaque type d'avion on peut associer un sous graphe de circulation.

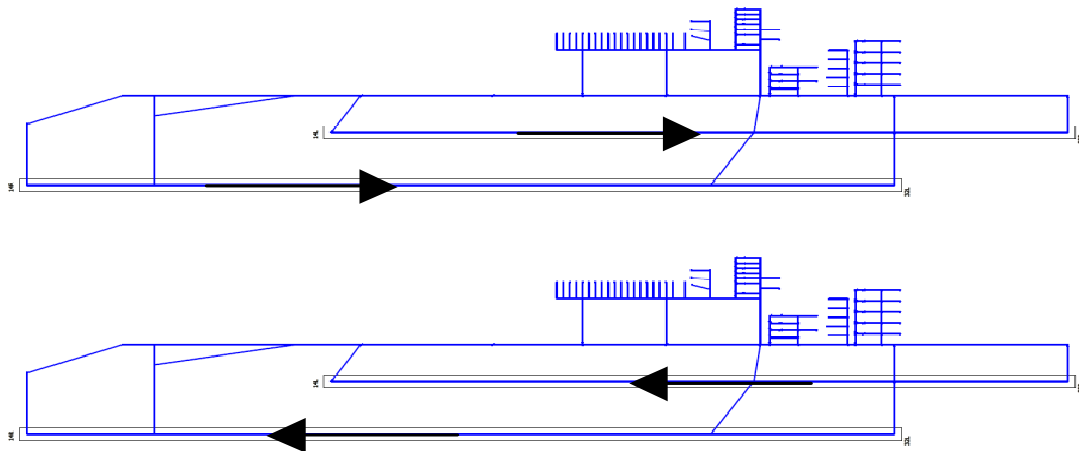


Figure VI.2 Le graphe associé à l'aéroport de Toulouse-Blagnac selon la direction du vent (QFU 14 et QFU 32)

On adopte la notation suivante :

$U$  l’ensemble des arcs représentant les voies de circulation et les aires de trafic ;

$U_{ad}$  l’ensemble des arcs des voies de circulation et des aires de trafic utilisées aussi bien pour les départs que pour les arrivées ;

$U_a$  l’ensemble des arcs des voies de circulation et des aires de trafic pour les arrivées ;

$U_d$  l’ensemble des arcs des voies de circulation et des aires de trafic pour les départs ;

$U = U_{ad} \cup U_a \cup U_d$  ;

$U'$  l’ensemble des arcs avec une double orientation ;

$U' = \{u \in U \mid \forall u = (a, b) \Rightarrow \exists u' = (b, a), a, b \in N\}$  ;

$I$  est l’ensemble des pistes en opération pendant la période de temps considérée ;

$R_i^s$  l’ensemble des arcs représentant les sorties de la piste  $i \in I$  ;

$R_i^e$  l’ensemble des arcs représentant les entrées de la piste  $i \in I$  ;

$J$  est l’ensemble de zones de postes disponibles pendant la période de temps considérée ;

$P_j^s$  l’ensemble des arcs représentant les sorties du poste  $j \in J$  ;

$P_j^e$  l’ensemble des arcs représentant les entrées du poste  $j \in J$ .

### VI.2.3 Représentation des flux de trafic

Le flux de trafic dans un tronçon de voie de circulation est égal au nombre de mouvements d’avions (soit à l’arrivée, soit au départ) qui y sont réalisés pendant l’intervalle de temps de référence.

On distingue donc les flux à l’arrivée et au départ, et on adopte les notations :  $\Phi^a$  est le flux total d’arrivées dans le réseau et  $\Phi^d$  est le flux total de départs du réseau,  $\varphi_u^a$  et  $\varphi_u^d$ , où  $\varphi_u^a$  est le flux à l’arrivée empruntant l’arc  $u$  et  $\varphi_u^d$  est le flux au départ empruntant l’arc  $u$ .

A chaque arc on peut associer des contraintes de capacité dont les niveaux peuvent être déduits de ses caractéristiques physiques et des caractéristiques opérationnelles des avions

l'empruntant (en particulier la vitesse moyenne de roulage et la composition moyenne en aéronefs du trafic).

On a alors :

$$0 \leq \varphi_u^a + \varphi_u^d \leq \varphi_u^{max}, u \in U_{ad} \quad (VI.1)$$

$$0 \leq \varphi_u^a \leq \varphi_u^{max}, u \in U_a \quad (VI.2)$$

$$0 \leq \varphi_u^d \leq \varphi_u^{max}, u \in U_d \quad (VI.3)$$

$$0 \leq \varphi_u^a \leq \varphi_u^{max}, u \in R_i^s, i \in I, \quad (VI.4)$$

$$0 \leq \varphi_u^d \leq \varphi_u^{max}, u \in R_i^e, i \in I \quad (VI.5)$$

$$0 \leq \varphi_u^a \leq \varphi_u^{max}, u \in P_j^e, j \in J, \quad (VI.6)$$

$$0 \leq \varphi_u^d \leq \varphi_u^{max}, u \in P_j^s, j \in J \quad (VI.7)$$

où  $\varphi_u^{max}$  est la capacité maximum du trafic du tronçon de voie de circulation associé, normalement il y a une entrée et une sortie pour chaque poste.

Afin d'obtenir un véritable modèle de réseau de transport, la conservation des flux, au niveau des différents points d'interconnexion du graphe représentant le système de circulation, doit être assurée. Ceci génère tout un ensemble de contraintes pour les flux définis plus haut. En ce qui concerne les points d'intersection des voies de circulation on doit avoir :

$$\sum_{u \in \omega^-(i)} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) + \sum_{v \in \omega^-(i)} \varphi_v^d + \sum_{w \in \omega^-(i)} \varphi_w^a = \sum_{u \in \omega^+(i)} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) + \sum_{v \in \omega^+(i)} \varphi_v^d + \sum_{w \in \omega^+(i)} \varphi_w^a, \quad (VI.8)$$

où  $u \in U, v \in U_d, w \in U_a$ ,  $\omega^-(i)$  l'ensemble des arcs incidents au nœud  $i$ ,  $\omega^+(i)$  l'ensemble des arcs sortants de nœud  $i$ .

On a aussi pour les entrées et sorties des pistes et des postes de stationnement :

$$\sum_{u \in R_i^s} \varphi_u^a = \Phi_i^a, \forall i \in I, \text{ où } \Phi_i^a \text{ est le flux à l'atterrissage sur la piste } i \quad (VI.9)$$

$$\sum_{u \in R_i^e} \varphi_u^d = \Phi_i^d, \forall i \in I, \text{ où } \Phi_i^d \text{ est le flux au décollage sur la piste } i \quad (VI.10)$$

$$\sum_{u \in P_j^s} \varphi_u^d - \Psi_j^d = 0, \forall j \in J, \text{ où } \Psi_j^d \text{ est le flux au départ du poste de stationnement } j \quad (VI.11)$$

$$\sum_{u \in P_j^e} \varphi_u^a - \Psi_j^a = 0, \forall j \in J, \text{ où } \Psi_j^a \text{ est le flux à l'arrivée au poste de stationnement } j. \quad (\text{VI.12})$$

Le passage d’un tronçon de réseau à l’autre est fait via les intersections où les flux concurrents interagissent, pour tenir compte des temps de traversée on introduit la contrainte suivante :

$$\sum_{u \in \omega^-(l)} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) \theta_l \leq T, \quad l \in L \quad (\text{VI.13})$$

où  $L$  est l’ensemble des intersections utilisées par des flux concurrents et  $\theta_l$  est le temps moyen de traversée de l’intersection  $l$ .

Dans le cas des arcs avec double orientation l’arc peut être utilisé dans un sens ou dans l’autre pendant l’intervalle de temps considéré. Ceci génère un autre type de contraintes au niveau des arcs :

$$\sum_{u \in U'} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) \tau_u + \sum_{u' \in U'} (\varphi_{u'}^a + \varphi_{u'}^d) \tau_{u'} \leq T \quad (\text{VI.14})$$

où  $\tau_u$  est le temps d’utilisation de l’arc dans un sens et  $\tau_{u'}$  est le temps d’utilisation de l’arc dans le sens opposé.

A ces contraintes on rajoute des équations qui représentent la répartition des flux globaux d’arrivée et de départ au niveau des pistes et des positions de stationnement :

$$\sum_{j \in J} \Psi_j^d = \Phi^d, \text{ sortie des postes} \quad (\text{VI.15})$$

$$\sum_{j \in J} \Psi_j^a = \Phi^a, \text{ entrée des postes} \quad (\text{VI.16})$$

$$\sum_{i \in I} \Phi_i^d = \Phi^d, \text{ entrée des pistes} \quad (\text{VI.17})$$

$$\sum_{i \in I} \Phi_i^a = \Phi^a, \text{ sortie des pistes.} \quad (\text{VI.18})$$

Si les flux globaux  $\Phi^a$  et  $\Phi^d$  sont des paramètres d’entrée du modèle de flux, leur ventilation suivant les mouvements au niveau des postes et des pistes, doit être déterminée par le modèle. Or, ces flux peuvent présenter des interdépendances dont il faut tenir compte dans le modèle.

---

Pour l'ensemble  $I_0$  des pistes dont les opérations d'atterrissage et de décollage ne sont pas couplées, les contraintes de capacité de ces pistes peuvent s'exprimer sous la forme :

$$\begin{cases} \lambda_{\alpha}^i \Phi_i^a + \gamma_{\alpha}^i \Phi_i^d \leq C_i \\ \alpha \in A_i, i \in I_0 \end{cases} \quad (\text{VI.19})$$

où  $\lambda_{\alpha}^i, \gamma_{\alpha}^i$  et  $C_i$  sont des paramètres réels positifs,  $A_i$  est un ensemble d'indices associées aux contraintes définissant un domaine convexe de capacité pour la piste  $i$ .

Pour un ensemble  $I_k$  de pistes dont les opérations sont interdépendantes, les équations précédentes peuvent se généraliser sous la forme :

$$\begin{cases} \sum_{i \in I_k} (\lambda_{\alpha}^{il} \Phi_i^a + \gamma_{\alpha}^{il} \Phi_i^d) \leq C_l \\ \alpha \in A_{kl}, l \in I_k, k \in K \end{cases} \quad (\text{VI.20})$$

où  $A_{kl}$  et  $I_k$  sont des ensembles d'indices associés au  $k^{\text{ème}}$  sous ensemble de pistes interdépendantes,  $K$  étant le nombre de sous systèmes de pistes indépendants les uns des autres.

Des considérations similaires peuvent être faites en ce qui concerne la capacité de stockage des postes de stationnement. Pour simplifier on supposera que ces capacités sont indépendantes. On introduira donc simplement les contraintes suivantes de capacité de stationnement :

$$0 \leq N_j^0 + \Psi_j^a - \Psi_j^d \leq S_j, j \in J \quad (\text{VI.21})$$

et

$$\sum_{j \in J} N_j^0 = N^0, \quad (\text{VI.22})$$

où  $S_j$  est la capacité de la  $j^{\text{ème}}$  zone de stationnement,  $N_j^0$  est le nombre de postes occupées au début de la période considérée dans la zone de stationnement  $j$ ,  $N^0$  est le nombre total de postes occupées au début de cette même période.

## VI.3 Evaluation de la capacité théorique

Compte tenu des remarques faites en chapitre IV.5.3, la capacité théorique sera caractérisée par une frontière de Pareto concernant  $\Phi^a$  et  $\Phi^d$  et paramétrée par  $\underline{N}^0$ . Celle-ci peut être

obtenue par une double itération de la résolution du problème de base noté  $P(\Phi^a, \underline{N}^0)$  associé à un couple de valeurs  $\underline{N}^0$  et  $\Phi^a, P(\Phi^a, \underline{N}^0)$  :

$$\max_{\underline{\varphi}, \underline{\Phi}, \underline{\Psi}, \underline{N}} \Phi^d$$

avec

$$\underline{\varphi} = \begin{pmatrix} \varphi^a \\ \varphi^d \end{pmatrix}, \underline{\Phi} = \begin{pmatrix} \Phi^a \\ \Phi^d \end{pmatrix}, \underline{\Psi} = \begin{pmatrix} \Psi^a \\ \Psi^d \end{pmatrix}, \underline{N} = \begin{pmatrix} N_1^0 \\ N_J^0 \end{pmatrix}$$

sous les contraintes :

$$\left( \begin{array}{l} \sum_{j \in J} \Psi_j^d = \Phi^d \\ \sum_{j \in J} \Psi_j^a = \Phi^a \\ \sum_{i \in I} \Phi_i^d = \Phi^d \\ \sum_{i \in I} \Phi_i^a = \Phi^a \\ \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i \in I_k} (\lambda_{\alpha}^{il} \Phi_i^a + \gamma_{\alpha}^{il} \Phi_i^d) \leq C_l \\ \alpha \in A_{kl}, l \in L_k, k \in K \end{array} \right. \\ \sum_{j \in J} N_j^0 = N^0, \quad N_j^0 \geq 0, \forall j \in J \\ 0 \leq N_j^0 + \Psi_j^a - \Psi_j^d \leq S_j, j \in J \\ \text{et } \underline{\varphi} \in F(\underline{\Phi}, \underline{\Psi}, \underline{N}), \end{array} \right.$$

où  $F(\underline{\Phi}, \underline{\Psi}, \underline{N})$  est le polytope convexe défini par les contraintes relatives aux flux  $\varphi_u^a, \varphi_u^d, u \in U$  pour des niveaux donnés de  $\underline{\Phi}, \underline{\Psi}$  et  $\underline{N}$  présentés au paragraphe précédent.

Remarquons bien que l’on considère ici une version du problème où les variables de flux et de stationnement sont assimilées à des variables continues, ceci notamment afin d’éviter les pièges de la résolution numérique de problème de programmation linéaire en nombres entiers [Pugh, 1992].

Remarquons que les contraintes associés aux flux constituent un sous ensemble séparé de l’ensemble des contraintes du problème  $P(\Phi^a, \underline{N}^0)$ . Il est le seul à mettre en jeu les flux



associés aux arcs du graphe représentant les voies de circulation. Sa connexion aux autres contraintes est assurée par les variables globales  $\underline{\Phi}, \underline{\Psi}$  et  $\underline{N}$ .

Si dans un premier cas on ignore les contraintes  $\varphi \in F(\underline{\Phi}, \underline{\Psi}, \underline{N})$ , qui peuvent limiter la capacité théorique au niveau des voies de circulation, on peut considérer le problème relaxé suivant noté  $\tilde{P}(\Phi^a, \underline{N}^0)$  :

$$\max_{\underline{\Phi}, \underline{\Psi}, \underline{N}} \Phi^d$$

sous les contraintes :

$$\left( \begin{array}{l} \sum_{j \in J} \Psi_j^d = \Phi^d \\ \sum_{j \in J} \Psi_j^a = \Phi^a \\ \sum_{i \in I} \Phi_i^d = \Phi^d \\ \sum_{i \in I} \Phi_i^a = \Phi^a \\ \sum_{j \in J} N_j^0 = N^0 \\ \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i \in I_k} (\lambda_{\alpha}^{il} \Phi_i^a + \gamma_{\alpha}^{il} \Phi_i^d) \leq C_l \\ \alpha \in A_{kl}, l \in L_k, k \in K \end{array} \right. \\ 0 \leq N_j^0 + \Psi_j^a - \Psi_j^d \leq S_j, j \in J \\ \text{avec} \\ \Psi_j^a \geq 0, \Psi_j^d \geq 0, j \in J \\ \Phi_i^a \geq 0, \Phi_i^d \geq 0, i \in I \\ N_j^0 \geq 0, j \in J. \end{array} \right.$$

La solution de ce problème,  $\tilde{\Phi}^d$ , sera un majorant de la solution du problème  $P(\Phi^a, \underline{N}^0)$ .

Si de plus il existe un flux  $\varphi$  qui appartienne à  $F(\tilde{\underline{\Phi}}, \tilde{\underline{\Psi}}, \tilde{\underline{N}})$  où  $(\tilde{\underline{\Phi}}, \tilde{\underline{\Psi}}, \tilde{\underline{N}})$  est la solution de  $\tilde{P}(\Phi^a, \underline{N}^0)$ , alors la solution en  $\Phi^d$  du problème  $P(\Phi^a, \underline{N}^0)$  sera telle que :

$$\Phi^{d*} = \tilde{\Phi}^d.$$

Et dans ce cas  $(N^0, \Phi^a)$ , le système de circulation apparaît comme non contraignant pour la capacité du système aéroportuaire qui dépendra alors uniquement de la capacité des systèmes de pistes et des zones de stationnement.

Dans le cas où  $F(\tilde{\Phi}, \tilde{\Psi}, \tilde{N})$  est vide, on ne saurait ignorer les contraintes associées au flux dans le système de circulation pour estimer la capacité du système aéroportuaire. Dans ce cas, on sera amené à résoudre le problème global de programmation linéaire  $P_\varphi(\Phi^a, \underline{N}^0)$  qui est équivalent au problème  $P(\Phi^a, \underline{N}^0)$  et où les flux associés aux arcs sont rendus explicites au niveau des contraintes globales.  $P_\varphi(\Phi^a, \underline{N}^0)$  est donné par :

$$\max_{\varphi, \underline{N}} \Phi^d$$

sous les contraintes :

$$\begin{aligned} & \sum_{j \in J} \sum_{u \in P_j^s} \varphi_u^d = \Phi^d \\ & \sum_{j \in J} \sum_{u \in P_j^e} \varphi_u^a = \Phi^a \\ & \sum_{i \in I} \sum_{u \in R_i^e} \varphi_u^d = \Phi^d \\ & \sum_{i \in I} \sum_{u \in R_i^s} \varphi_u^a = \Phi^a \\ & \left\{ \sum_{i \in I_k} \left( \lambda_{\alpha}^{il} \sum_{u \in R_i^s} \varphi_u^a + \gamma_{\alpha}^{il} \sum_{u \in R_i^e} \varphi_u^d \right) \leq C_l \right. \\ & \quad \left. \alpha \in A_{kl}, l \in L_k, k \in K \right. \\ & 0 \leq N_j^0 + \sum_{u \in P_j^e} \varphi_u^a - \sum_{u \in P_j^s} \varphi_u^d \leq S_j, j \in J \\ & \sum_{j \in J} N_j^0 = N^0, \quad N_j^0 \geq 0, \forall j \in J \\ & \sum_{u \in \omega^-(i)} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) + \sum_{v \in \omega^-(i)} \varphi_v^d + \sum_{w \in \omega^-(i)} \varphi_w^a = \sum_{u \in \omega^+(i)} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) + \sum_{v \in \omega^+(i)} \varphi_v^d + \sum_{w \in \omega^+(i)} \varphi_w^a, \\ & \text{où } u \in U_{ad}, v \in U_d, w \in U_a \\ & \sum_{u \in \omega^-(l)} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) \theta_l \leq T, \quad l \in L \\ & \sum_{u \in U'} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) \tau_u + \sum_{u' \in U'} (\varphi_{u'}^a + \varphi_{u'}^d) \tau_{u'} \leq T \end{aligned}$$

avec les contraintes de capacité de flux (VI.1)–(VI.7).

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \varphi_u^a + \varphi_u^d \leq \varphi_u^{max}, u \in U_{ad} \\ 0 \leq \varphi_u^a \leq \varphi_u^{max}, u \in U_a \\ 0 \leq \varphi_u^d \leq \varphi_u^{max}, u \in U_d \\ 0 \leq \varphi_u^a \leq \varphi_u^{max}, u \in R_i^s, i \in I \\ 0 \leq \varphi_u^d \leq \varphi_u^{max}, u \in R_i^e, i \in I \\ 0 \leq \varphi_u^a \leq \varphi_u^{max}, u \in P_j^e, j \in J \\ 0 \leq \varphi_u^d \leq \varphi_u^{max}, u \in P_j^s, j \in J \end{array} \right.$$

Ce dernier problème peut alors être résolu à l'aide d'un algorithme de type arc non conformes (« out of kilter ») [Fulkerson, 1961].

Le schéma itératif d'identification de la capacité théorique du système aéroportuaire peut alors être représenté par :

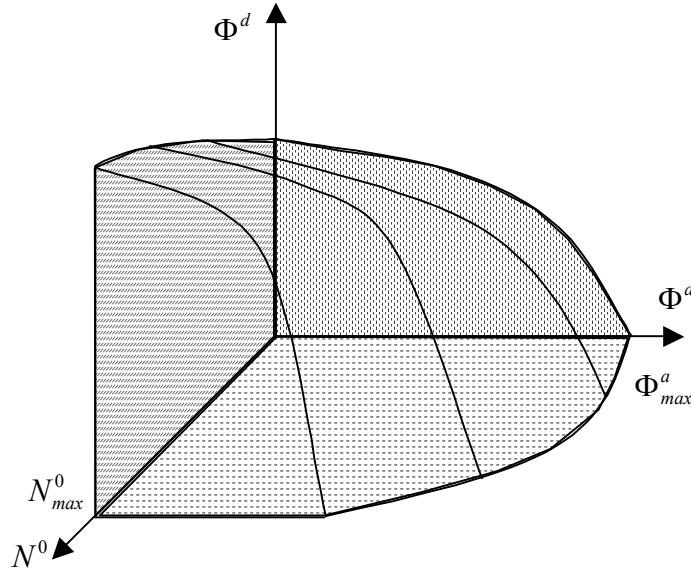
```

POUR  $N^0 = N_{max}^0, \dots, 0$ ,  $N^0$  décroissant
  POUR  $\Phi^a = 0, \dots, \Phi_{max}^a$ ,  $\Phi^a$  croissant
    Résoudre le problème  $P(\Phi^a, \underline{N}^0)$ 
    SI ce problème admet une solution ALORS on obtient le point
       $(\Phi^a, \underline{N}^0, \Phi^{d*})$  de la frontière Pareto
    SINON on interrompt l'itération sur  $\Phi^a$  et on retourne en  $N^0$ .
  fin POUR
fin POUR.
```

où  $N_{max}^0$  est le nombre maximum de postes de stationnement utilisables simultanément sur la plate-forme aéroportuaire et  $\Phi_{max}^a$  est la solution du problème noté  $P(\Phi^a)$  donné par :

$$\begin{array}{l} \max \Phi^a \\ \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i \in I_k} \lambda_{\alpha}^l \Phi_i^a \leq C_l, \quad \alpha \in A_{kl}, l \in L_k, k \in K \\ \sum_{i \in I} \Phi_i^a = \Phi^a \\ \text{avec } \Phi_i^a \geq 0, i \in I. \end{array} \right. \end{array}$$

Au débouché de ce processus numérique très lourd, on obtiendra le domaine de capacité théorique. Celui-ci peut être représenté de façon schématique dans un espace 3D, sous la forme suivante :



**Figure VI.3 Représentation tridimensionnelle de la capacité théorique aéroportuaire**

L'évaluation de la capacité théorique ne tient pas compte des interdépendances entre les flux qui génèrent des retards ni de la capacité des contrôleurs de trafic (il faut associer de zones de contrôle à chaque contrôleur et définir une capacité par zone de contrôle). La capacité pratique sera en fait largement inférieure à cette capacité théorique.

## VI.4 Evaluation de la capacité opérationnelle

Dans ce paragraphe on se place dans une situation opérationnelle caractérisée par les données de flux d'arrivée et l'occupation des postes au début de la période considérée :

$$\Phi_i^a, i \in I \text{ et } N_j^0, j \in J$$

et on suppose que la capacité opérationnelle sera atteinte pour un niveau global de départs  $\Phi^d$  de manière à ce que le retard moyen devienne égal à un seuil à ne pas dépasser. Cette approche pose donc le problème de l'évaluation des retards dans le système de circulation au sol.

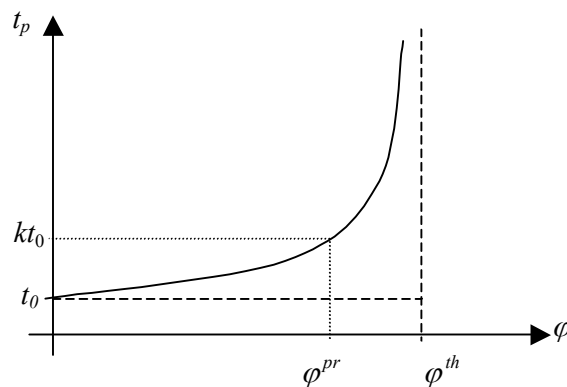
### VI.4.1 Evaluation des retards

Si l'on considère la relation qui relie le temps moyen de parcours d'un tronçon de voie de circulation au flux moyen qui le parcourt, on peut admettre que celle-ci, par analogie avec ce qui peut se passer pour le trafic automobile, soit un modèle tel que celui représenté sur la figure VI.4 où  $t_p$  est le temps moyen de parcours et  $\varphi$  le flux de l'arc. On considère  $t_0$  le temps moyen de parcours dans des conditions de congestion nulle ( $\varphi \cong 0$  et  $\varphi > 0$ );  $\varphi^{pr}$  est le flux pratique pour un temps de parcours  $kt_0$ ;  $\varphi^{th}$  est la capacité théorique de l'arc en termes de flux qui est donnée par l'expression :

$$\varphi^{th} = \max_V \frac{V}{D_{min}(V)}$$

avec  $V \leq V_{max}$ ,

où  $V_{max}$  est la vitesse maximale autorisée sur cette voie et  $D_{min}(V)$  est la vitesse minimum entre deux aéronefs circulant avec la vitesse  $V$ .



**Figure VI.4 Variation du temps moyen de parcours en fonction du flux**

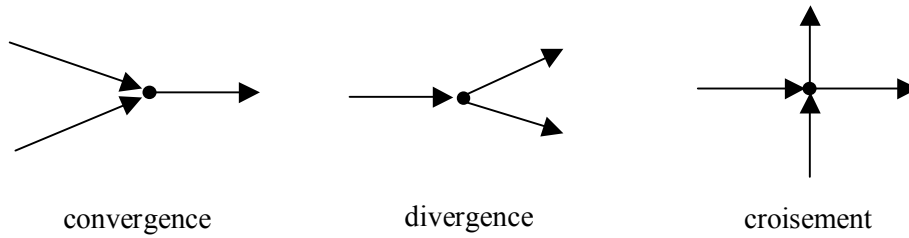
Dans ce modèle le temps moyen de parcours croît infiniment lorsqu'on s'approche de la capacité théorique. Ceci correspond en fait à la formation d'une file qui couvre peu à peu l'ensemble du segment de voie de circulation. Les mouvements ne peuvent plus se dérouler dans des conditions régulières, ils deviennent de plus en plus chaotiques et conduisent au blocage total de la voie de circulation.

Un modèle analytique de retard obéissant à ce comportement et par ailleurs analogue à l’un des plus accepté dans le domaine du trafic urbain [Gazis et Potts, 1963], est le suivant :

$$t_p(\varphi) = t_0 \left( 1 + c \cdot \left( \frac{\varphi}{\varphi^{th}} \right)^\alpha \right),$$

où  $\alpha$  est un paramètre réel tel que  $\alpha > 1$ .

Dans le cas où le flux de l’arc considéré interagit avec d’autres flux concurrents au niveau de sa sortie, il faut tenir compte de l’effet de retard qui en résulte. La figure VI.5 représente quelques cas d’interaction au niveau des sorties d’un arc.



**Figure VI.5 L’exemple d’interaction de flux au niveau de sorties**

On associe alors à chaque arc  $u$  un modèle donnant le temps moyen de parcours  $t_u$  en fonction du flux de trafic qui emprunte ce tronçon et les tronçons adjacents pendant la période de référence. Un modèle de retard unitaire suffisamment réaliste mais conservant un degré de complexité acceptable est donné par :

$$t_u(\varphi) = \frac{l_u}{\tilde{v}_u} (1 + \alpha_u \varphi_u)^{\gamma_u} + \sum_{j \in \omega^-(u)} \varphi_j \tau_j$$

où :

$l_u$  est la longueur de l’arc  $u$ ,

$\tilde{v}_u$  est la vitesse standard d’avancement libre d’un avion le long de l’arc  $u$ ,

$\alpha_u$  et  $\gamma_u$  sont des facteurs caractérisant l’effet de congestion dû au flux de circulation sur l’arc  $u$ ,

$\omega^-(u)$  est l’ensemble d’arcs incidents à l’arc  $u$ ,

$\tau_j$  est le délai moyen additionnel résultant du flux transversal  $\varphi_j$  et permettant de tenir compte indirectement de facteurs tels que des attentes, des séparations minimales et des angles de braquage maximaux.

De façon plus générale, on pourra décrire le retard moyen total associé au flux parcourant un arc  $u$  par une expression telle que :

$$f_u(\varphi_u, \mathcal{T}_u^-)$$

où  $\mathcal{T}_u^- = \{ \varphi_v \mid v \in \omega^-(i), v \neq u \}$ .

### VI.4.2 Formulation du problème d'optimisation de la circulation des flux

Pour ce problème on considère que le flux total à l'arrivée  $\Phi^a$  est donné et que la répartition initiale des avions aux postes est connue. On cherche alors à maximiser le flux au départ tout en satisfaisant les contraintes opérationnelles et en assurant un niveau moyen de retard inférieur à un seuil préfixé.

Le problème, noté par  $P_{\Phi^d}(\Phi^a, \underline{N}^0)$ , formulé directement s'écrit :

$$\max_{\Phi^d, \underline{N}_j^0} \Phi^d$$

avec

$$\frac{\sum_{u \in U} f_u(\varphi_u, \mathcal{T}_u^-)}{\sum_{u \in U} \varphi_u} \leq d_{max} \quad (VI.23)$$

et les contraintes associées aux flux dans le réseau résumant les contraintes (VI.1) – (VI.20) :

$$\left( \begin{array}{l} \underline{\mathbf{A}} \underline{\varphi} = \underline{\mathbf{0}} \\ \underline{\mathbf{A}}_I \underline{\varphi} = \underline{\Phi} \\ \underline{\mathbf{A}}_J \underline{\varphi} = \underline{\Psi} \\ (\underline{\mathbf{A}}_L \underline{\varphi}) \underline{\theta}_L \leq \underline{T} \\ (\underline{\mathbf{A}}_{U'} \underline{\varphi}) \underline{\tau} \leq \underline{T} \\ \underline{\Lambda} \underline{\Phi}^a + \underline{\Gamma} \underline{\Phi}^d \leq \underline{\mathbf{C}} \\ \underline{\mathbf{0}} \leq \underline{N}^0 + \underline{\Psi}^a - \underline{\Psi}^d \leq \underline{\mathbf{S}} \\ \underline{N}^0 \mathbf{1}^T = N^0 \\ \underline{\Phi}^a \mathbf{1}^T = \Phi^a, \underline{\Phi}^d \mathbf{1}^T = \Phi^d, \underline{\Psi}^a \mathbf{1}^T = \Phi^a, \underline{\Psi}^d \mathbf{1}^T = \Phi^d \\ \underline{\mathbf{0}} \leq \underline{\varphi} \leq \underline{\varphi}^{max}, \underline{\mathbf{0}} \leq \underline{\Psi} \leq \underline{\Psi}^{max}, \underline{\mathbf{0}} \leq \underline{\Phi} \end{array} \right.$$

où  $d_{max}$  est le retard maximum admissible ;  $\mathbf{A}$  est la matrice d'incidence des arcs au nœuds ;  $\mathbf{A}_I$  est la matrice d'incidence des arcs de sortie et entrée de pistes au nœuds de la piste ;  $\mathbf{A}_J$  est la matrice d'incidence des arcs de sortie et entrée de postes au nœuds des postes ;  $\mathbf{A}_L$  est la matrice d'incidence des arcs des intersections au nœuds et  $\mathbf{A}_{U'}$  est la matrice d'incidence des arcs double orientés au nœuds.

Celui-ci n'ayant pas une forme standard on peut par un procédé itératif se ramener au problème d'optimisation suivant, noté  $P_f(\Phi^a, \underline{N}^0, \Phi^d)$ , où  $\Phi^d$  est progressivement augmenté jusqu'à ce que le problème  $P_{\Phi^d}(\Phi^a, \underline{N}^0)$  n'ait plus de solution admissible ou qu'à sa solution la contrainte (VI.23) ne soit plus satisfaite.

Problème  $P_f(\Phi^a, \underline{N}^0, \Phi^d)$  :

$$\min_u \sum_{u \in U} f_u(\varphi_u, \tau_u^-) \quad (\text{VI.24})$$

Sous les contraintes de capacité physique des arcs et de conservation des flux :

$$0 \leq \varphi_u^a + \varphi_u^d \leq \varphi_u^{max}, u \in U \quad (\text{VI.25})$$

$$\sum_{u \in \omega^-(i)} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) + \sum_{v \in \omega^-(i)} \varphi_v^d + \sum_{w \in \omega^-(i)} \varphi_w^a = \sum_{u \in \omega^+(i)} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) + \sum_{v \in \omega^+(i)} \varphi_v^d + \sum_{w \in \omega^+(i)} \varphi_w^a \quad (\text{VI.26})$$

$$\sum_{u \in \omega^-(l)} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) \theta_l \leq T, l \in L \quad (\text{VI.27})$$

$$\sum_{u \in U'} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) \tau_u + \sum_{u' \in U'} (\varphi_{u'}^a + \varphi_{u'}^d) \tau_{u'} \leq T \quad (\text{VI.28})$$

sous les contraintes de consistance avec les données du problème :

$$\sum_{u \in R_i^a} \varphi_u^a = \Phi_i^a, \forall i \in I \quad (\text{VI.29})$$

$$\sum_{u \in R_i^d} \varphi_u^d = \Phi_i^d, \forall i \in I \quad (\text{VI.30})$$

$$\sum_{u \in P_j^s} \varphi_u^d - \Psi_j^d = 0, \forall j \in J \quad (\text{VI.31})$$

$$\sum_{j \in J} \Psi_j^d = \Phi^d \quad (\text{VI.32})$$

$$0 \leq \Psi_j^a \leq \Psi_j^{a^{max}}, j \in J \quad (\text{VI.33})$$



$$\left[ \sum_{u \in P_i^e} \varphi_u^a - \Psi_j^a = 0, \forall j \in J \right. \quad (\text{VI.34})$$

$$\sum_{j \in J} \Psi_j^a = \Phi^a \quad (\text{VI.35})$$

$$0 \leq \Psi_j^d \leq \Psi_j^{dmax}, j \in J \quad (\text{VI.36})$$

$$0 \leq N_j^0 + \Psi_j^a - \Psi_j^d \leq S_j, j \in J \quad (\text{VI.37})$$

et sous les contraintes de capacité de contrôle par secteurs :

$$\sum_{u \in \Omega_k^{ad}} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) + \sum_{v \in \Omega_k^d} \varphi_v^d + \sum_{w \in \Omega_k^a} \varphi_w^a \leq Z_k, \quad k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (\text{VI.38})$$

où :

- $\Phi_i^a$  est la demande d'arrivées de la piste  $i$  ;
- $\Phi_i^d$  est la demande de départs pour la piste  $i$  ;
- $\Psi_j^{a max}$  est le flux maximum d'arrivées au poste  $j$  ;
- $\Psi_j^{d max}$  est le flux maximum de départ du poste  $j$  ;
- $\Omega_k = \Omega_k^{ad} \cup \Omega_k^d \cup \Omega_k^a$  est le sous ensemble  $k$  des voies de circulation contrôlées par les contrôleurs de trafic au sol, de capacité  $Z_k$ .  $K$  est le nombre de zones de contrôle sur l'aéroport (il est possible d'avoir plusieurs contrôleurs assignés à une zone de contrôle).

Les contraintes (VI.25)-(VI.28) représentent les contraintes de capacité pour chaque arc. La contrainte (VI.26) impose la conservation des flux au niveau d'une intersection de voies de circulation. Les contraintes (VI.29) et (VI.30) concernent la conservation des flux d'arrivée et de départ pour les pistes. Les contraintes (VI.32)–(VI.37) concernent les postes de stationnement : ils imposent le passage des flux par les postes. La contrainte (VI.38) représente la prise en compte de la capacité de chaque contrôleur de trafic sol et du découpage en zones de contrôle de la plate-forme aéroportuaire.

Les contraintes (VI.31) et (VI.34) tiennent compte de la demande des compagnies aériennes pour les postes. Les valeurs de  $\Psi_j^a$ ,  $\Psi_j^d$ ,  $\Psi_j^{a max}$  et  $\Psi_j^{d max}$  peuvent résulter d'un processus d'affectation des postes, ce qui constitue un sous problème à résoudre avant le problème principal.

### VI.4.3 Une approche d’évaluation de la capacité pratique

Compte tenu de la difficulté à prévoir de façon précise les retards associés à une distribution des flux dans les voies de circulation de l’aéroport, une approche alternative peut être proposée. Celle-ci met à profit le concept d’optimisation pour générer des scénarios de distribution de flux et ceux-ci peuvent alors être évalués de façon beaucoup plus fine par simulation. Dans ce cas là, le critère d’optimisation retenu peut comprendre un simple indice d’interaction entre les flux concurrents au niveau des intersections tel que :

$$f(\underline{\varphi}) = \sum_{u \in U} l_u \varphi_u + \sum_{l \in L} \sum_{u \in \omega^-(l)} \sum_{\substack{v \in \omega^-(l) \\ v \neq u}} c_{uv} \varphi_u \varphi_v$$

ou aussi :

$$f^e(\underline{\varphi}) = \sum_{u \in U} l_u \varphi_u - \sum_{l \in L} \sum_{u \in \omega^-(l)} d_u \varphi_u \log \left( \frac{\varphi_u}{\sum_{v \in \omega^-(l)} \varphi_v} \right)$$

où les  $c_{uv}$  et  $d_u$  sont des coefficients positifs ou nuls.

Dans ces deux cas il s’agit pour le critère de comptabiliser, outre les coûts associés directement à la circulation dans le réseau, les effets croisés entre flux concurrents au niveaux des intersections.

Dans le premier cas, le problème d’optimisation appelé ici  $P_{op}(\Phi^a, \underline{N}^0, \Phi^d)$  s’écrit :

$$\min \left( \sum_{u \in U} l_u \varphi_u + \sum_{l \in L} \sum_{u \in \omega^-(l)} \sum_{\substack{v \in \omega^-(l) \\ v \neq u}} c_{uv} \varphi_u \varphi_v \right)$$

sous les contraintes :

$$\begin{cases} 0 \leq \varphi_u^a + \varphi_u^d \leq \varphi_u^{max}, u \in U \\ 0 \leq \varphi_v^d \leq \varphi_v^{max}, \varphi_v^a = 0, v \in U_d \\ 0 \leq \varphi_w^a \leq \varphi_w^{max}, \varphi_w^d = 0, w \in U_a \\ \sum_{u \in \omega^-(i)} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) + \sum_{v \in \omega^-(i)} \varphi_v^d + \sum_{w \in \omega^-(i)} \varphi_w^a = \sum_{u \in \omega^+(i)} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) + \sum_{v \in \omega^+(i)} \varphi_v^d + \sum_{w \in \omega^+(i)} \varphi_w^a \\ \sum_{u \in \omega^-(l)} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) \theta_l \leq T, l \in L \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{u \in U'} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) \tau_u + \sum_{u' \in U'} (\varphi_{u'}^a + \varphi_{u'}^d) \tau_{u'} \leq T \\
& \sum_{u \in R_i^s} \varphi_u^a = \Phi_i^a, \forall i \in I \\
& \sum_{u \in R_i^e} \varphi_u^d = \Phi_i^d, \forall i \in I \\
& \sum_{u \in P_j^s} \varphi_u^d - \Psi_j^d = 0, \forall j \in J \\
& \sum_{j \in J} \Psi_j^d = \Phi^d \\
& 0 \leq \Psi_j^a \leq \Psi_j^{a^{max}}, j \in J \\
& \sum_{u \in P_j^e} \varphi_u^a - \Psi_j^a = 0, \forall j \in J \\
& \sum_{j \in J} \Psi_j^a = \Phi^a \\
& 0 \leq \Psi_j^d \leq \Psi_j^{d^{max}}, j \in J \\
& 0 \leq N_j^0 + \Psi_j^a - \Psi_j^d \leq S_j, j \in J \\
& \sum_{u \in \Omega_k^{ad}} (\varphi_u^a + \varphi_u^d) + \sum_{v \in \Omega_k^d} \varphi_v^d + \sum_{w \in \Omega_k^a} \varphi_w^a \leq Z_k, \quad k \in \{1, 2, \dots, K\}.
\end{aligned}$$

Ce problème admettant un critère non convexe, les méthodes de programmation quadratique convexe ne sont pas applicables ici puisqu'elles pourraient mener à des solutions locales sous optimales, comment cela est très simplement illustré sur la figure VI.6 :

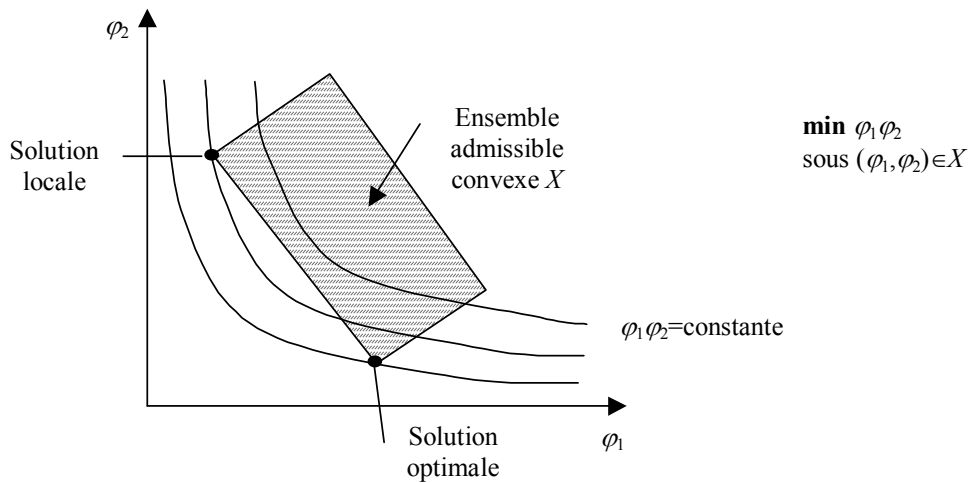


Figure VI.6 Optimum local et global pour le problème d'optimisation non convexe

Une solution pour éviter d'avoir à utiliser des méthodes de recherche globale (très lourdes sur le plan numérique et ne donnant que peu de garantie sur la qualité de la solution obtenue) peut être de convexifier cette fonction objectif en la modifiant. Ainsi, l'introduction de termes carrés dans le critère conduira à l'expression :

$$f(\underline{\varphi}) = \sum_{u \in U} l_u^2 \varphi_u^2 + \sum_{l \in L} \sum_{u \in \omega^-(l)} \sum_{\substack{v \in \omega^-(l) \\ v \neq u}} c_{uv} \varphi_u \varphi_v$$

La fonction critère sera ainsi rendue convexe si, compte tenu du fait que la concurrence entre deux flux ne s'exerce qu'au niveau d'une seule intersection, la condition suivante est satisfaite pour les matrices sous-Hessiennes de  $f$  :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi_u^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi_u \partial \varphi_v} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi_v \partial \varphi_u} & \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi_v^2} \end{bmatrix} \geq 0, \forall l \in L, u \in \omega^-(l), v \in \omega^-(l), v \neq u$$

ou encore

$$4l_u^2 l_v^2 - c_{uv}^2 \geq 0, \forall l \in L, u \in \omega^-(l), v \in \omega^-(l), v \neq u$$

Dans ce cas, on peut par exemple en considérant que l'arc  $u$ , est à un facteur positif près la longueur, assimiler le nouveau terme de critère d'optimalité à une pénalité quadratique appliquée aux distances totales parcourues sur chacun des arcs du réseau. Si cette interprétation est jugée acceptable par le décideur, des algorithmes tel que celui proposé par Minoux [Minoux, 1984], voir annexe A, basés sur les opérations de linéarisation par morceaux conduisent à une solution optimale en temps polynomial.

Sinon il s'agit de résoudre le problème à critère non convexe précédent.

La solution de ce problème peut être approximée en utilisant la méthode stochastique de montée en charge qui est décrite ici :

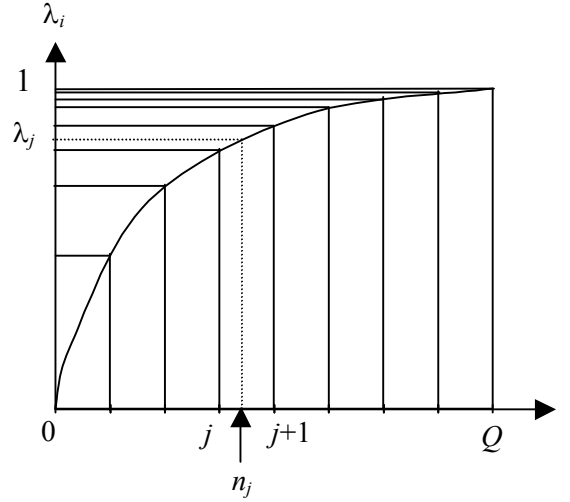
Pour cela on considère une séquence de flux totaux d'arrivée et de départs  $\Phi^{a_i}$  et  $\Phi^{d_i}$ ,  $i = 0, \dots, Q$ , tels que :

$$\Phi^{a_i} = \lambda_i \Phi^a \text{ et } \Phi^{d_i} = \lambda_i \Phi^d$$

avec

$$\lambda_i = 1 - \left( \frac{Q - i - n_i}{Q + i + n_i} \right)^p, i = 0, \dots, Q$$

où  $p$  est un entier non nul et  $n_i$  résulte d'un tirage aléatoire équiréparti sur l'intervalle  $]0, 1]$ .



**Figure VI.7 Schéma de chargement progressif pour le réseau**

On résout alors le problème  $P_{op}(\Phi^{a_i}, \underline{N}^0, \Phi^{d_i})$  où le critère d'optimalité est remplacé par le critère linéaire suivant :

$$\sum_{u \in U} l_u \varphi_u + \sum_{l \in L} \sum_{u \in \omega^-(l)} \sum_{\substack{v \in \omega^-(l) \\ v \neq u}} c_{uv} (\varphi_u^{i-1} \varphi_v + \varphi_u \varphi_v^{i-1})$$

$\varphi_u^{i-1}$ ,  $u \in \omega^-(l)$  et  $\varphi_v^{i-1}$ ,  $v \in \omega^-(l)$ ,  $v \neq u$ ,  $l \in L$  résultent de la solution de ce même problème à l'itération  $i-1$ .

Ce dernier problème est un problème de programmation linéaire, plus spécialement de minimisation du coût d'un flot dans un réseau, pour lequel il existe plusieurs algorithmes performants [Gondrant et Minoux, 1995]. Pour initialiser ce processus, il est nécessaire de posséder une solution de base  $\{(\varphi_u^0, \varphi_v^0), u \in \omega^-(l), v \in \omega^-(l), l \in L\}$ .

Celle-ci peut être obtenue par exemple en considérant que pour des faibles chargements ( $0 < \lambda_0 \leq 1 - \left(\frac{1-n_i}{1+n_i}\right)^p$ ) les interactions entre les flux conflictuels sont négligeables et qu'un critère plus représentatif de l'optimalité du flot est la longueur totale, tous types d'avion confondus, parcourue par le flot dans le réseau et donné par :

$$\sum_{u \in U} l_u \varphi_u$$

Ceci revient à faire une approximation de premier ordre de l'expression du critère d'optimalité du problème  $P_{op}(\Phi^a, \underline{N}^0, \Phi^d)$ .

Là aussi, on se retrouve avec un problème de coût minimum d'un flot dans un réseau.

Malgré cette opération répétée de linéarisation, le problème initial n'en est pas moins resté non convexe. Afin d'obtenir une assurance de la qualité de la solution obtenue, l'ensemble du

processus (montée en charge – résolution des problèmes d’optimisation linéarisés) peut être répété un bon nombre de fois avant de sélectionner la meilleure solution obtenue à pleine charge.

Une fois retenue une solution au problème à pleine charge du réseau, une évaluation par simulation des retards associés à celle-ci peut être effectuée. Un simulateur à base d’événements discrets a été développé [Nuria, 2002] à cette fin. Le simulateur AGMS (Airport Ground Movement Simulator, voir annexe B) développé au Département Transport Aérien de l’ENAC, permet non seulement de calculer les retards moyens globaux, mais aussi d’évaluer ce qui se passe au niveau de chaque intersection et donc de détecter les situations locales de saturation qui ne peuvent être détectées par le modèle de flux moyens du problème d’optimisation précédent. Pour mettre en œuvre ce simulateur, les itinéraires suivis par les avions au cours de leur déplacement sont construits par tirage aléatoire au niveau des intersections du réseau en accord avec la distribution optimale des flux donnée par la solution du problème  $P_{op}(\Phi^a, \underline{N}^0, \Phi^d)$ .

On a donc finalement la structure suivante d’évaluation de la capacité pratique :

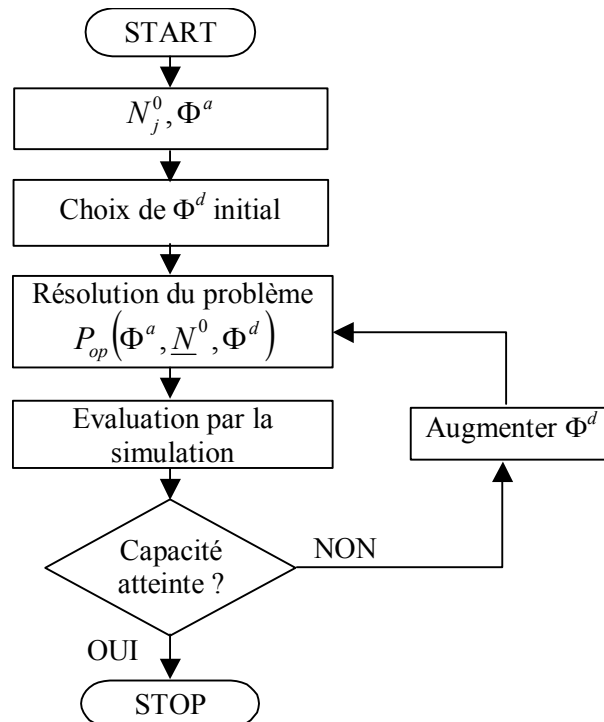


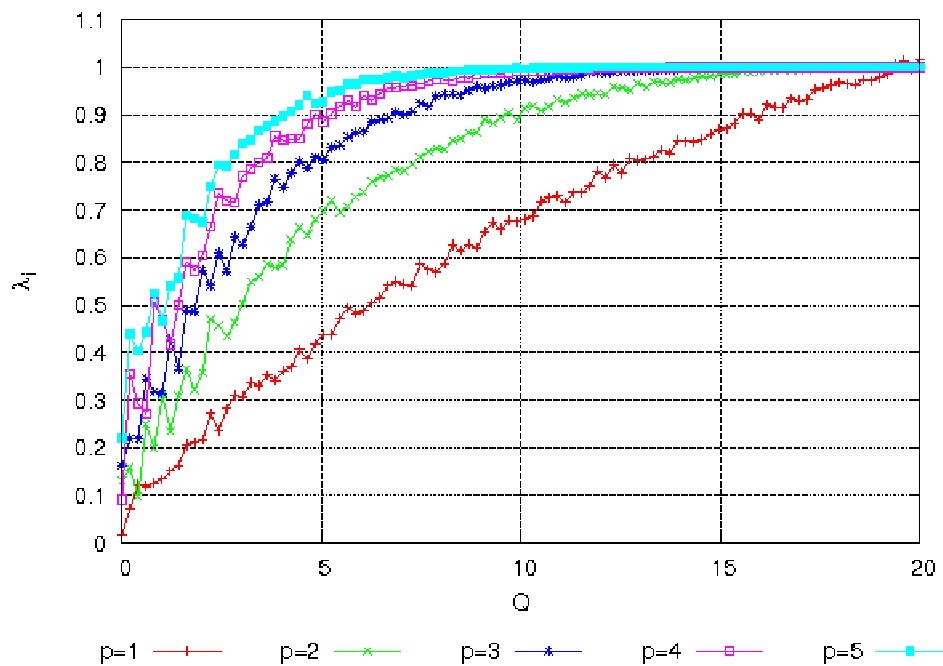
Figure VI.8 Algorithme d’évaluation de la capacité pratique

---

### VI.4.4 Résultats numériques

Les résultats présentés graphiquement ci-dessous obtenus par utilisation répétée du logiciel LPSOLVE [LPSolve] illustrent l'approche numérique proposée dans le cas de l'aéroport de Toulouse-Blagnac (voir figure VI.2).

On a retenu pour les paramètres les valeurs  $Q = 20$  et  $p = 5$ , ce qui donne un schéma de chargement tel que :



**Figure VI.9 Schéma de chargement retenu**

La figure VI.10 présente la capacité théorique obtenue pour l'aéroport de Toulouse-Blagnac en QFU 14. et QFU 32. La figure VI.11 présentent alors les résultats de chargement du réseau correspondants au problème  $P_{op}(30,20,40)$  pour QFU 14. La dispersion des résultats finaux obtenus au cours des séquences successives de résolution (10 fois chaque fois) sont représentés sur la figure VI.12. Finalement, sur la figure VI.13, plusieurs points de la frontière de capacité pratique, estimée pour un coût moyen de 1750 par déplacement, sont représentés.

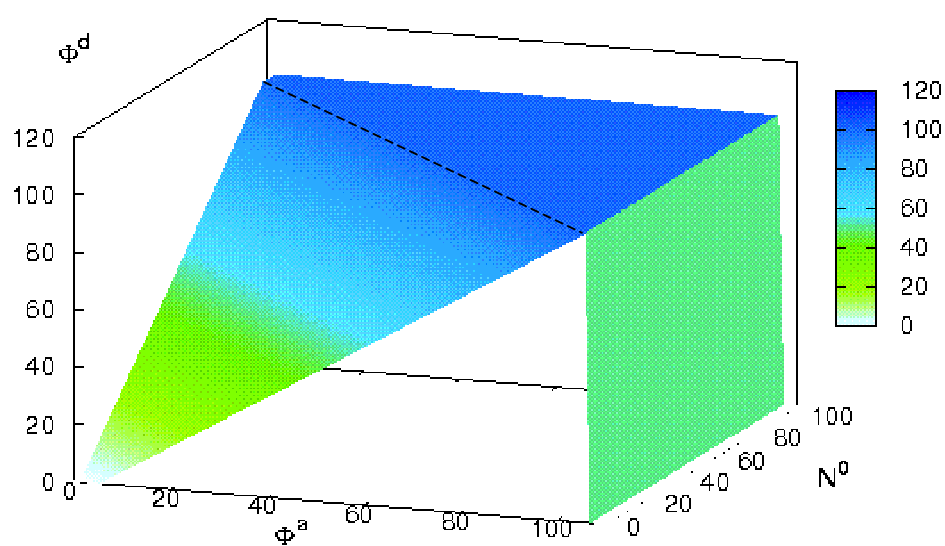


Figure VI.10 Evaluation de la capacité théorique ( $\Phi^a=105$ ,  $\Phi^d=115$ )

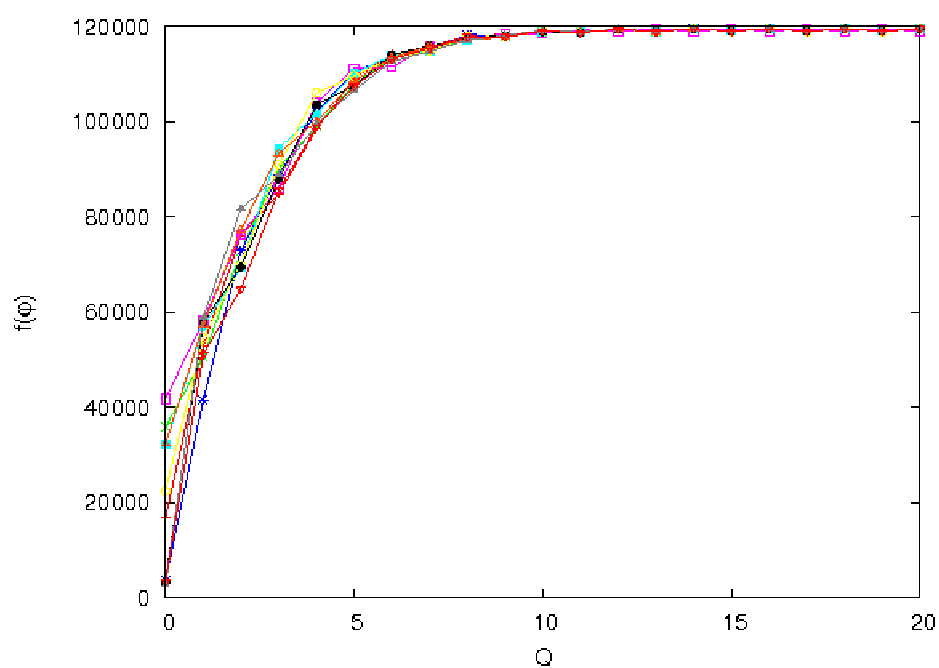


Figure VI.11 Valeur du critère au cours du chargement du réseau ( $\Phi^a=30$ ,  $\Phi^d=40$ )



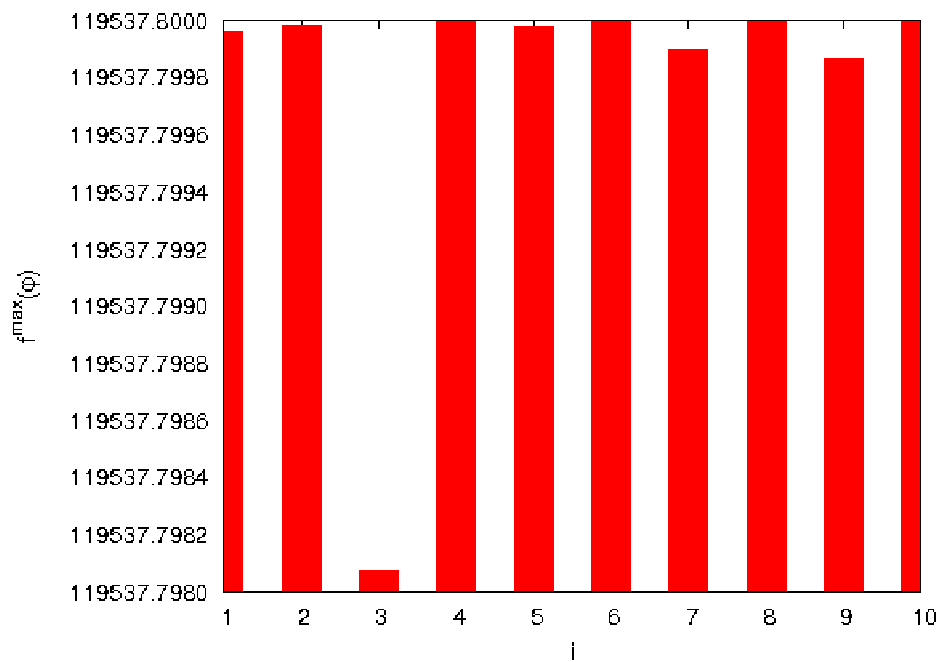


Figure VI.12 Distribution des performances obtenues à pleine charge ( $\Phi^a=30$ ,  $\Phi^d=40$ )

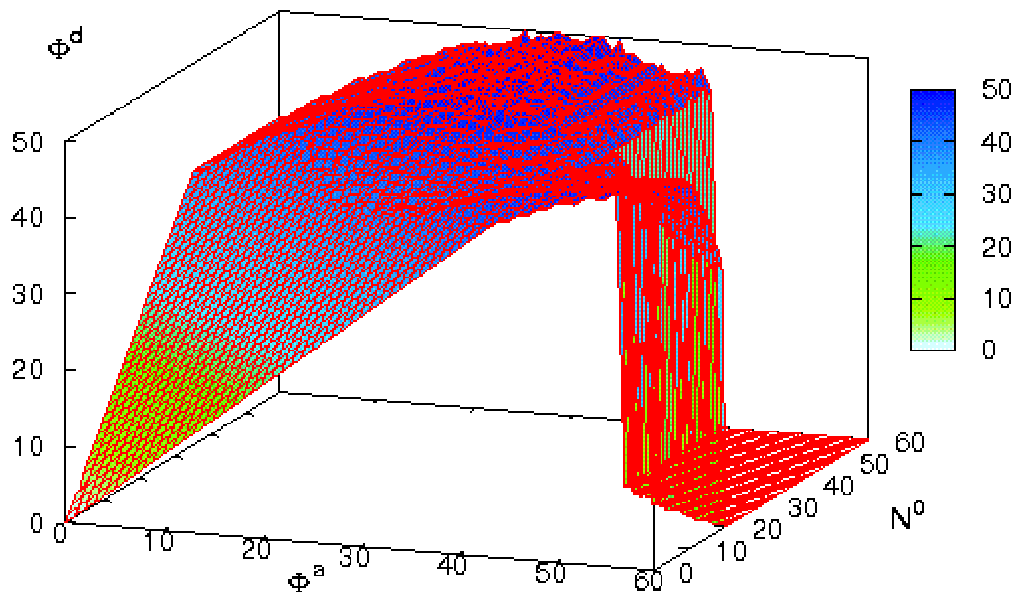


Figure VI.13 Exemple e représentation tridimensionnelle de la capacité aéroportuaire

## **VI.5 Conclusion et perspectives**

Ainsi, il a été possible de développer sur le plan pratique les considérations présentées au chapitre IV en ce qui concerne les notions de capacité théorique et de capacité pratique par la mise en place d’une série de problèmes de minimisation d’un coût associé à un modèle de flux dans un réseau.

La finesse de la représentation adoptée permet alors d’utiliser les résultats d’une telle analyse :

- Dans des études préliminaires de réaménagement des voies de circulation et de manœuvre et de leur utilisation,
- Dans la formulation des problèmes de planification opérationnelle importants :
  - Affectation des zones de stationnement aux compagnies aériennes,
  - Affectation prévisionnelle des créneaux d’opérations (arrivées et départs),
- Finalement dans l’élaboration d’indices de référence permettent d’identifier de façon distribuée dans le réseau de voies de circulation des situations particulières pouvant devenir critiques.



## **Partie 3 – La gestion du trafic avion au sol**



# Chapitre VII – Les problèmes décisionnels pour la gestion du trafic au sol

## VII.1 Introduction

Avant de présenter dans le dernier chapitre de ce mémoire une proposition de système d'aide à la décision pour la gestion du trafic avion au sol, on aborde dans ce chapitre de façon globale l'analyse de l'ensemble des problèmes de gestion qui se posent aux contrôleurs dans le cadre de la planification opérationnelle.

Trois de ces problèmes sont ensuite considérés et les principales méthodes et techniques de résolution qui ont été développées pour eux, sont analysées.

## VII.2 Analyse de la fonction de gestion du trafic avion au sol

La gestion du trafic au sol des aéronefs consiste à prendre les décisions tactiques qui vont fixer le cadre opérationnel du contrôle du trafic au sol. Celle-ci concerne simultanément la gestion des arrivées et des départs. A partir d'informations sur la situation courante et des prévisions de trafic, il s'agit de définir ou de redéfinir les paramètres conditionnant le déplacement des aéronefs au sol.

Pour la gestion des arrivées les informations suivantes sur chaque avion à l'arrivée doivent être disponibles :

- la piste d'atterrissage prévue et l'instant d'atterrissage. Cette information est fournie par le système de contrôle de trafic aérien qui en coordination avec le système de gestion au sol apporte en ligne des solutions à ce problème (**Problème G0**). Sa précision, notamment en ce qui concerne l'instant d'atterrissage dépend fortement de l'horizon de prévision.
- le poste, ou la zone des postes de stationnement prévue, cette information pouvant être donnée par la compagnie aérienne opérant l'aéronef si celle-ci dispose de créneaux de stationnement et gère ceux-ci ou sinon par le système de gestion du trafic au sol.

Il s'agira donc éventuellement de choisir d'abord un poste de stationnement (**Problème G1**), puis de déterminer un itinéraire entre la sortie de piste et celui-ci (**Problème G2**). Le système de contrôle du trafic au sol se chargera alors de guider pas à pas (**Problème C1**) l'avion suivant cet itinéraire.

Pour la gestion des départs les informations suivantes sur chaque avion au départ doivent être disponibles :

- le poste de stationnement
- l'heure programmée de départ

Ces informations sont disponibles auprès de la compagnie aérienne et doivent être regroupées au niveau du système de gestion du trafic au sol.

Les problèmes de décision à résoudre sont les suivants :

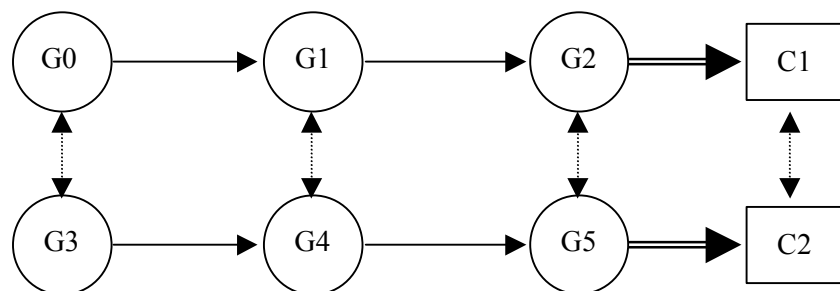
Pour chaque avion prévu au départ, il s'agira de faire les choix suivants :

- choix de la piste de décollage (**Problème G3**),
- choix de l'instant de sortie du poste de stationnement (**Problème G4**)
- choix de l'itinéraire entre le poste de stationnement et la piste (**Problème G5**).

Le système de contrôle du trafic au sol se chargera alors de guider pas à pas (**Problème C2**) l'avion suivant cet itinéraire.

L'ensemble de ces problèmes présente des interdépendances résultant des relations de succession entre certaines décisions et des interactions des flux au niveau des voies de circulation, de stationnement et de la piste.

On peut donc dresser le tableau suivant :



**Figure VII.1 Interdépendances entre problèmes de gestion et de contrôle du trafic au sol des aéronefs**

Une autre dimension doit être examinée ici, il s'agit du temps : Les décisions doivent être prises suffisamment longtemps à l'avance pour être d'une utilité opérationnelle certaine (ceci permet de mettre en œuvre à temps les moyens logistiques appropriés). Néanmoins, ces prises de décision vont se baser sur des prévisions sur l'état du système et plus l'horizon des prévisions sera étendu, plus le degré d'incertitude sur celles-ci sera élevé.

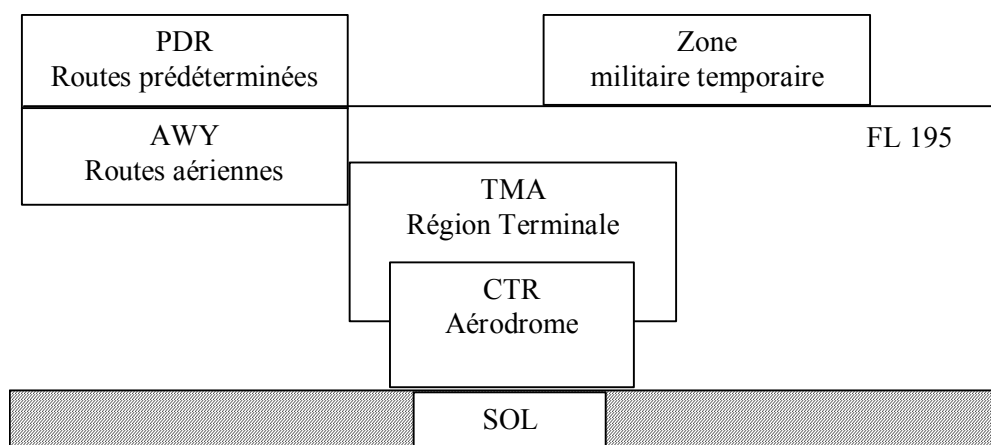
Compte tenu de la diversité des problèmes de gestion à traiter et du nombre d'études qui leur a été consacré, dans le reste de ce chapitre un état de l'art concernant quelques un des ces problèmes G0, G1, G2 et G5 est présenté. Ces problèmes permettent de retenir pour l'ensemble des problèmes de gestion du trafic au sol des aéronefs, les principales approches de modélisation et de recherche de solution.

### **VII.3 La gestion des arrivées (Problème G0)**

Pour les aéroports qui sont soumis à un fort trafic, le problème d'ordonnancement des atterrissages est un problème critique car, mettant à contribution l'un des goulots d'étranglement du système aéroportuaire, il conditionne la capacité globale de l'aéroport. De nombreux travaux ont porté sur ce problème [Abela et al., 1993], [Beasley et al., 1999], [Beasley et al., 2000], [Beasley et al., 2001]. Considérant que les atterrissages sont souvent prioritaires sur les décollages, ce problème a pu être traité dans beaucoup de communications [Bloat, 2000], [Carr et al., 1998], [Ernst et Krishnamonorthy, 2001] indépendamment du problème du séquençement des décollages.

Le problème de la gestion des atterrissages des avions arrivant vers une plate-forme aéroportuaire comprenant une ou plusieurs pistes, ressemble à celui de l'ordonnancement des tâches dans un atelier où les durées de service dépendent de l'ordre d'arrivée [Bianco et al., 1988], [Psaraftis, 1980], [Storer et al., 1992] des pénalités d'avance ou de retard devant être utilisées. Le but est de faire atterrir dans les meilleures conditions possibles un flux maximum d'avions incidents vers l'aéroport et ses pistes : les affectations de pistes d'atterrissage, les ordonnancements et les fenêtres d'atterrissage programmées doivent être tels que les critères de séparation entre toutes les paires d'avions soient satisfaits, tout en minimisant les pénalités subies par les avions (retards, surconsommation de carburant).

Ce problème de gestion (G0) se place à l'interface entre le trafic au sol et le trafic aérien. Il pose donc le problème de la coordination entre les systèmes de gestion du trafic au sol et du trafic aérien. En ce qui concerne le trafic aérien, se pose aussi le problème de la prise en compte de la structure de l'espace aérien environnant l'aéroport (voir figure VII.2) dans la gestion des flux incidents à travers les différents espaces de contrôle. Ainsi ce type de système devra être compatible avec des outils tels que MAESTRO [Bourdon, 1998] qui aide le contrôleur de trafic aérien dans sa gestion de la transition entre la route et l'approche.



**Figure VII.2 Organisation de l'espace aérien**

Dans la littérature, on peut distinguer les études où une seule piste d'atterrissage est utilisée de celles où plusieurs pistes opèrent simultanément à l'atterrissage ; en effet le niveau de complexité de ces dernières est beaucoup plus grand puisque la solution de ce problème interagit plus fortement avec le problème de contrôle du trafic aérien dans la TMA.

### **VII.3.1 Cas d'une seule piste d'atterrissage**

Si l'on considère le problème de l'optimisation des ordonnancements à l'arrivée dans le cas d'une seule piste, le problème se révèle relativement simple :

Par exemple, [Ernst et Krishnamoorthy, 2001] ont considéré ce problème et l'ont formulé comme celui de la minimisation des écarts entre les instants d'atterrissage et les instants prévus sous les contraintes de séparation temporelle et de respect des créneaux d'atterrissage :



$$\min \sum_{i \in N} (g_i \max\{0, T_i - t_i\} + h_i \max\{0, t_i - T_i\})$$

sous les contraintes :

$$t_i + S_{ij} \leq t_j, \forall i, j \in N, i \neq j, \text{ si } b_{ji} = 0$$

$$b_{ji} + b_{ij} = 1, \forall i, j \in N, i \neq j$$

$$E_i \leq t_i \leq L_i, \forall i \in N$$

$$b_{ij} \in \{0, 1\}$$

$N$  est l'ensemble d'avions,  $N = \{1, \dots, n\}$  ;  $[E_i, L_i]$  est le créneau d'atterrissage de l'avion  $i$  ;  $T_i$  est le temps nominal d'atterrissage ;  $S_{ij}$  est la séparation minimale entre les avions  $i$  et  $j$ , si l'avion  $i$  atterrit avant l'avion  $j$ ,  $S_{ij} > 0 \forall i, j \in N$  ;  $g_i$  est la pénalité d'avance de l'avion  $i$  et  $h_i$  est la pénalité de retard de l'avion  $i$ .

Ces auteurs ont transformé cette formulation du problème pour en faire celle d'un problème de programmation linéaire en variables mixtes (les  $t_i$  sont continus et les  $b_{ij}$  sont binaires) néanmoins ils ont proposé une approche heuristique pour résoudre ce problème en deux niveaux. Au niveau du problème d'ordonnancement (choix de  $b_{ij}$ , c'est le « sequencing ») une heuristique de type glouton [Gondrant et Minoux, 1995] est mise en œuvre, il lui correspond au niveau de la programmation des instants d'atterrissage (choix de  $t_i$ , c'est le « scheduling ») un problème de programmation linéaire en variables continues qui peut être résolu efficacement par un algorithme simplex de type réseau [Orlin, 1996]. Les résultats affichés montrent que cette approche heuristique peut être mise en œuvre en temps réel compte tenu de durées de calcul de l'ordre de quelques secondes, alors que les performances obtenues semblent satisfaisantes.

### VII.3.2 Cas de plusieurs pistes d'atterrissage

Par contre si on considère ce problème dans le cas de pistes multiples d'atterrissage sa complexité croît très fortement.

C'est le cas dans [Beasley et al., 2000] où le problème d'ordonnancement à court terme (sur un horizon d'une demi heure) des atterrissages des avions sur un aéroport où fonctionnent plusieurs pistes d'atterrissage a été considéré. Il s'agit ici aussi d'optimiser les instants

d'atterrissage de chaque avion dans une fenêtre prédéterminée de temps en essayant de coller au mieux aux instants d'atterrissage souhaités (ou programmés) par les compagnies aériennes, les opérateurs d'aéronefs en général ou les autorités de contrôle du trafic aérien (Eurocontrol).

Pour cela une formulation mathématique en variables mixtes (variables continues et variables binaires) de ce problème est ici aussi proposée. Il s'agit de minimiser la fonction coût donnée par :

$$C = \sum_{i=1}^N (g_i \alpha_i + h_i \beta_i)$$

sous un grand nombre de contraintes qui utilisent les variables continues  $\alpha_i$  (l'avance à l'atterrissage de l'avion  $i$ ),  $\beta_i$  (le retard à l'atterrissage de l'avion  $i$ ) et  $x_i$  (le temps d'atterrissage de l'avion  $i$ ) et les variables binaires  $\delta_{ij}$  ( $\delta_{ij}=1$  si l'avion  $i$  atterrit avant l'avion  $j$  et  $\delta_{ij}=0$  sinon),  $z_{ij}$  ( $z_{ij}=1$  si l'avion  $i$  et l'avion  $j$  atterrissent sur la même piste et  $z_{ij}=0$  sinon) et  $y_{ir}$  ( $y_{ir}=1$  si l'avion  $i$  atterrit sur la piste  $r$  et  $y_{ir}=0$  sinon).

$R$  est le nombre de pistes,  $[E_i, L_i]$  est le créneau d'atterrissage prévu pour l'avion  $i$ ,  $T_i$  est l'instant nominal d'atterrissage pour l'avion  $i$ ,  $S_{ij}$  est la séparation minimale en temps pour l'atterrissage consécutif des avions  $i$  et  $j$ ,  $s_{ij}$  est la séparation en temps entre l'atterrissage des avions  $i$  et  $j$  avec  $z_{ij}=0$ .

$N$  est le nombre d'avions considérés,  $g_i$  est le coût unitaire de la pénalité pour un atterrissage anticipé,  $h_i$  est le coût unitaire de la pénalité pour un atterrissage en retard.

Il est alors nécessaire de définir plusieurs ensembles discrets relatifs aux avions et aux pistes :

$U$  est l'ensemble des paires d'avions  $(i, j)$  pour lesquelles on n'est pas certain que l'avion  $i$  se posera avant l'avion  $j$  :

$$U = \{(i, j) \mid i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, i \neq j, E_j \leq E_i \leq L_j \text{ ou } E_j \leq L_i \leq L_j \text{ ou } E_i \leq E_j \leq L_i \text{ ou } E_i \leq L_j \leq L_i\}$$

$U^*$  est l'ensemble des paires d'avions  $(i, j)$  pour lesquelles il est impossible que l'avion  $j$  atterrisse avant l'avion  $i$  (cas d'une même piste) compte tenu de leurs performances opérationnelles (vitesses d'approche) :

$$U^* = \{(i, j) \mid (i, j) \in U, E_j + S_{ji} > L_i\}$$

$U^{**}$  est l'ensemble des paires d'avions  $(i, j)$  pour lesquelles il est impossible que l'avion  $j$  atterrisse avant l'avion  $i$  (cas de pistes différentes) :

$$U^{**} = \{(i, j) \mid (i, j) \in U, E_j + s_{ji} > L_i\}$$

$V$  est l'ensemble des paires d'avions  $(i, j)$  pour lesquelles il est certain que l'avion  $i$  atterrira avant l'avion  $j$  sans que l'on ait la certitude que la contrainte de séparation soit satisfaite :

$$V = \{(i, j) \mid i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, i \neq j, L_i < E_j \text{ et } L_i + S_{ij} > E_j\}$$

$W$  est l'ensemble des paires d'avions  $(i, j)$  pour lesquelles il est certain que l'avion  $i$  atterrira avant l'avion  $j$  avec la certitude que la contrainte de séparation soit satisfaite :

$$W = \{(i, j) \mid i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, i \neq j, L_i < E_j \text{ et } L_i + S_{ij} \leq E_j\}$$

Les principales contraintes et conditions logiques considérées sont alors :

le respect des créneaux d'atterrissage :

$$E_i \leq x_i \leq L_i, i = 1, \dots, N$$

les conditions logiques de réalisation des atterrissages :

$$\delta_{ij} + \delta_{ji} = 1, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, j > i$$

$$\delta_{ij} = 1, \forall (i, j) \in W \cup V$$

les limitations des avances et retards dans les créneaux d'atterrissage :

$$\alpha_i \geq T_i - x_i, i = 1, \dots, N$$

$$0 \leq \alpha_i \leq T_i - E_i, i = 1, \dots, N$$

$$\beta_i \geq x_i - T_i, i = 1, \dots, N$$

$$0 \leq \beta_i \leq L_i - T_i, i = 1, \dots, N$$

$$x_i = T_i - \alpha_i + \beta_i, i = 1, \dots, N$$

les conditions logiques d'utilisation des pistes pour les atterrissages :

$$\sum_{r=1}^R y_{ir} = 1, i = 1, \dots, N$$

$$z_{ij} = z_{ji}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, j > i$$

$$z_{ij} \geq y_{ir} + y_{jr} - 1, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, r = 1, \dots, R, j > i$$

la satisfaction des séparations minimales :

$$x_j \geq x_i + S_{ij} z_{ij} + s_{ij} (1 - z_{ij}), \forall (i, j) \in V$$

$$x_j \geq x_i + S_{ij} z_{ij} + s_{ij} (1 - z_{ij}) - (L_i + \max(S_{ij}, s_{ij}) - E_j) \delta_{ji}, \forall (i, j) \in U$$

les conditions logiques d'ordonnancement des atterrissages :

$$\delta_{ij} \geq (x_j - x_i) / (L_j - E_i), \forall (i, j) \in U$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, i \neq j}^N \delta_{ij} = N(N-1)/2$$

$$\begin{aligned}
 \delta_{ij} &\geq 1 - (\beta_i + \alpha_j) / (T_j - T_i), \forall (i, j) \in U, T_i < T_j \\
 (\alpha_i + \beta_i) + (\alpha_j + \beta_j) &\geq (S_{ij} - (T_j - T_i))\delta_{ij} + ((T_j - T_i) + S_{ji})\delta_{ji} \\
 &\quad - \max\{S_{ij} - (T_j - T_i), (T_j - T_i) + S_{ji}\}(1 - z_{ij}), \forall (i, j) \in U, T_i < T_j, (T_j - T_i) < S_{ij} \\
 \delta_{ji} + z_{ij} &\leq 1, \forall (i, j) \in U^* \\
 \delta_{ji} + (1 - z_{ij}) &\leq 1, \forall (i, j) \in U^{**}
 \end{aligned}$$

Le problème de l'ordonnancement des atterrissages se ramène ici aussi à un problème de programmation linéaire en variables mixtes qui présente une complexité très élevée. Pourtant les auteurs ont rapporté des résultats satisfaisants lors de l'utilisation de CPLEX [CPLEX] dans des problèmes tests impliquant jusqu'à 50 avions, et ceci que ce soit en temps de calcul comme en performance de la solution. Néanmoins, la complexité de la formulation du problème et l'opacité de son processus d'optimisation ont conduit ces mêmes auteurs à envisager l'emploi d'heuristiques pour apporter une solution opérationnelle plus robuste pour ce problème.

Ces mêmes auteurs [Beasley et al., 2001] ont aussi résolu ce problème en utilisant les algorithmes génétiques.

Les données opérationnelles utilisées pour la validation par simulation des résultats obtenus sur l'aéroport de Londres Heathrow, indiquent une réduction des attentes de l'ordre de 2% à 5% suivant le volume de trafic, en les comparant aux pratiques opérationnelles en vigueur. Néanmoins, la formulation du problème est statique et rien n'est dit sur son implémentation dans un environnement hautement dynamique.

Les résultats obtenus démontrent la possibilité de résoudre pratiquement en temps réel, grâce à des heuristiques, le problème de la gestion des atterrissages. Néanmoins aucune de ces approches ne comptabilise explicitement les pénalités infligées au trafic désirant décoller ni les bénéfices qui pourraient être obtenus par la formation de trains d'avions à l'atterrissage. Beaucoup reste donc à faire dans ce domaine.

## VII.4 La gestion des postes de stationnement (Problème G1)

Le problème de la gestion des postes de stationnement des avions est un problème d'affectation dynamique, voire d'ordonnancement, qui consiste à assigner à chaque avion à l'arrivée un poste ou une zone de stationnement compatible avec ses caractéristiques opérationnelles et commerciales. Il s'agit non seulement de satisfaire des contraintes de séparation entre avions de types variés dans la zone de manœuvre et aux postes de stationnement voisins, mais aussi d'éliminer toutes les situations potentielles de conflit avec les autres avions tant à l'arrivée comme au départ de cette zone (les principaux types de conflits présents dans les zones de manœuvre au voisinage des postes de stationnement sont représentés ci-dessous).

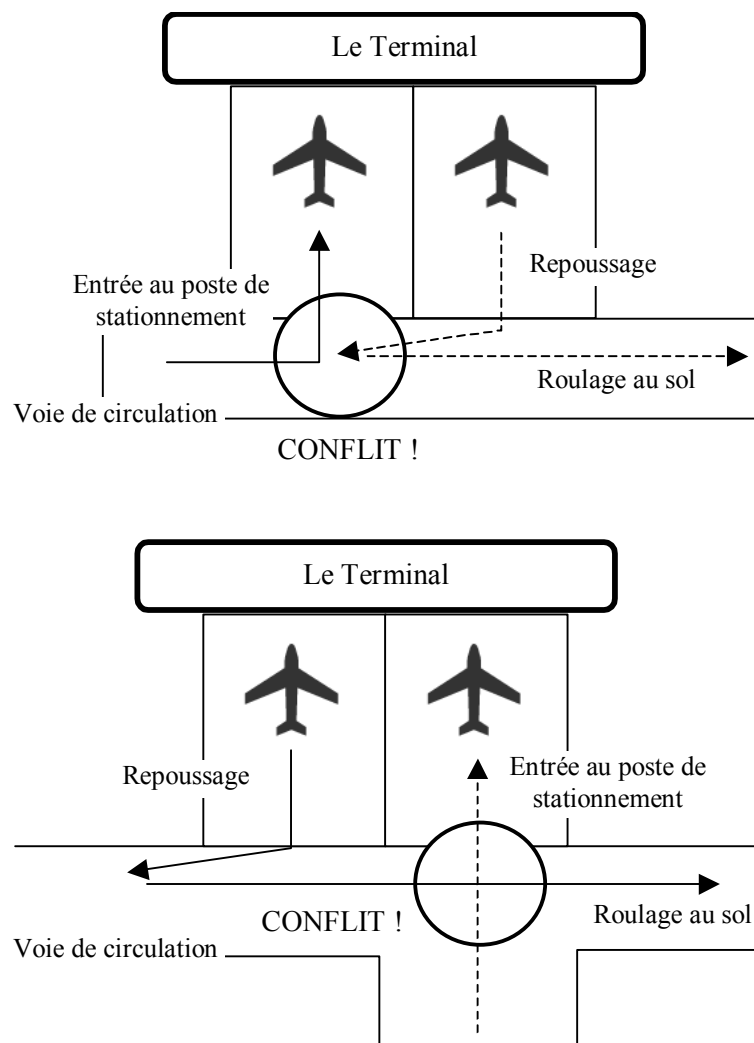


Figure VII.3 Exemple de conflits entre avions dans la zone de stationnement

Même formulé sous forme déterministe (les instants d'arrivée des avions représentent un processus nettement aléatoire) d'un problème d'optimisation mathématique, ce problème appartient à la classe des problèmes NP-complets. Il est d'ailleurs difficile de prendre en compte sous une forme algébrique, toutes ses contraintes. Ainsi l'utilisation des techniques de l'Intelligence Artificielle telles que le raisonnement sous contraintes [Cheng, 1997], [Cheng, 1998a], [Cheng, 1998b] et les systèmes experts [Jo et al., 1997], [Jo et al., 2000] ont été envisagées.

### VII.4.1 Approche par la programmation mathématique

L'approche de résolution du problème d'affectation des postes de stationnement par la programmation mathématique peut être illustrée par différentes études représentatives ([Yan et al., 2002], [Yan et Huo, 2001], [Hanghani et Chen, 1998]).

Pour l'affectation des postes, [Yan et al., 2002], considérant qu'il y a beaucoup de facteurs de nature peu prévisible qui affectent les opérations d'allocation des postes sur un aéroport, ont proposé une approche en deux étapes : d'abord l'affectation optimale des postes aux avions est effectuée dans un cadre déterministe, puis celle-ci est validée par simulation dans un cadre stochastique au niveau opérationnel. La simulation permet d'évaluer les effets des retards des vols sur l'affectation statique de postes et donc de dimensionner les temps tampon nécessaires à l'affectation des postes.

Le problème d'optimisation considéré se formule comme un programme en variables entières :

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij} x_{ij}$$

sous les contraintes :

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^M x_{ij} &= 1, i = 1, \dots, N \\ \sum_{i \in L_s} x_{ij} &\leq 1, \forall s, j = 1, \dots, M \\ x_{ij} &\in \{0, 1\}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M \end{aligned}$$

$N$  est le nombre total d'avions,  $M$  est le nombre total de postes de stationnement,  $c_{ij}$  est la distance totale parcourue par les passagers du vol  $i$  affecté au poste  $j$ ,  $L_s$  est l'ensemble de tout les vols qui peuvent être positionnés au poste  $s$ ,  $x_{ij}$  sont les variables de décision  $x_{ij} = 1$  si le vol  $i$  est assigné au poste  $j$  et  $x_{ij} = 0$  sinon.

Il s'agit donc ici de trouver une affectation des postes qui minimise la distance totale parcourue par les passagers compte tenu de cette affectation. D'autres critères prenant plus en compte l'intérêt des compagnies aériennes, auraient pu être envisagés.

Ce problème a été résolu par une technique de type « branch and bound ». La solution optimale a été comparée à celle résultant de différentes heuristiques élaborées par les opérateurs et a montré une nette supériorité en ce qui concerne les performances obtenues.

Des auteurs tel que [Yan et Huo, 2001] ont considéré que ce problème avait une nature multicritère, ce qui a conduit à la formulation :

$$\begin{aligned} & \min \{Z_1, Z_2\} \\ & \text{avec} \\ & Z_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=B_i}^{L_i} (c_{ij} - x_{ijk}) \\ & Z_2 = \sum_{i=1}^N \left( P_i \left( \sum_{j=1}^M \sum_{k=B_i}^{L_i} kx_{ijk} - B_i \right) \right) \end{aligned}$$

sous les contraintes :

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^M \sum_{k=B_i}^{L_i} x_{ijk} = 1, i = 1, \dots, N \\ & \sum_{i \in F_j} \sum_{k \in H_{is}} x_{ijk} \leq 1, \forall s, j = 1, \dots, M \\ & x_{ijk} \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M, k = B_i, \dots, L_i \\ & H_{is} = \{k \mid B_i \leq k \leq L_i, k \leq s \leq k + h_i + f\} \end{aligned}$$

Le premier critère concerne la distance totale parcourue alors que le deuxième critère traite du temps total d'attente des passagers à l'arrivée. Il s'agit donc de trouver des solutions non inférieures admissibles.

$Z_1$  est la distance totale parcourue par les passagers,  $Z_2$  est le temps total d'attente des passagers,  $x_{ijk}$  sont les variables de décision du problème :

$x_{ijk}=1$  si le vol  $i$  est affecté au poste de stationnement  $j$  pendant l'intervalle  $k$  et  $x_{ijk}=0$  sinon.

$P_i$  est le nombre total de passagers pour le vol  $i$ ,  $N$  est l'ensemble des vols,  $M$  est l'ensemble des postes de stationnement,  $k$  est le  $k^{\text{ème}}$  intervalle de temps,  $B_i$  est l'instant au plus tôt auquel le vol  $i$  peut être affecté à un poste de stationnement,  $L_i$  est l'instant au plus tard pour l'affectation du vol  $i$  à un poste de stationnement,  $c_{ij}$  est la distance totale de parcourue par les passagers du vol  $i$  affecté au poste  $j$ ,  $F_j$  est l'ensemble des vols qui peuvent être affectés au poste  $j$ .

Ce problème multicritère en variables entières a été résolu en deux étapes : d'abord une pondération [Hwang, 1979] est utilisée pour transformer le problème multicritère en une suite de problèmes mono critère. Chacun des ces problèmes sont résolus par une technique de génération de colonnes [Lavoire et al., 1988], [Desrochers et Soumis, 1989], [Marin, 2003] associée à une technique de « branch and bound » [Sheffi et al., 1990].

Des données réelles pour une journée type de l'aéroport CKS de Taiwan ont été employées pour évaluer la performance de la méthode proposée. Les résultats montrent que les temps de calcul sont acceptables et son applicabilité dans un environnement opérationnel.

Dans [Hanghani et Chen, 1998] le problème d'affectation de postes de stationnement est considéré de façon plus globale puisqu'il inclut aussi bien les arrivées, les transferts et les départs. Il est formulé comme :

$$\min \left( \sum_i \sum_{i'} \sum_j \sum_{j'} P_{ii'} D_{jj'} x_{ijt} x_{i'jt'} + \sum_i \sum_j (P_{io} D_{jo} + P_{oi} D_{oj}) x_{ijt} \right)$$

Sous les conditions logiques :

$$\sum_j x_{ijt} = 1, \forall i, t_i^a \leq t \leq t_i^d$$

et les conditions opérationnelles :

$$\sum_i x_{ijt} \leq 1, \forall j, t$$

$$x_{ijt} \leq x_{ij(t+1)}, \forall t, t_i^a \leq t \leq t_i^d$$

$$\sum_j \sum_{j'} x_{ijt} x_{i'jt'} = 1, \forall i \neq i'$$

Les variables binaires  $x_{ijt}$  représentent l'affectation de vol  $i$  au poste  $j$  pendant l'intervalle de temps  $t$ ,  $P_{ii'}$  représente le nombre de passagers transférés entre le vol  $i$  et  $i'$ ,  $P_{io}$  représente le nombre de passagers qui arrivent avec le vol  $i$ ,  $P_{oi}$  représente le nombre de passagers qui part avec le vol  $i$ ,  $D_{jj'}$ ,  $D_{jo}$  et  $D_{oj}$  représentent les distance parcourues par les passagers entre les



portes d'embarquement,  $t_i^a$  est l'instant d'arrivée au poste de stationnement du vol  $i$  et  $t_i^d$  est l'instant de départ du poste de stationnement du vol  $i$ .

Une simple heuristique de type glouton qui consistant à affecter l'avion qui a le plus grand nombre de passagers à son bord au poste de stationnement qui minimise son coût a été testée et comparée à une résolution exacte par le CPLEX, donnant des résultats très voisins.

### VII.4.2 Approches par les systèmes à base de règles

Différents travaux ont été réalisés ces dernières années pour proposer des approches de résolution utilisant les techniques de l'Intelligence Artificielle pour le problème d'affectation des postes de stationnement.

Ainsi, ont été développés des systèmes d'aide à l'affectation des postes de stationnement aux avions, basés sur les systèmes experts, la programmation sous contraintes et les techniques de satisfaction de contraintes [Fox, 1987], [Prosser, 1993], [Jo et al., 1997]. Ces techniques permettent en général de mieux prendre en compte les contraintes complexes de nature logique qui apparaissent dans ce type de problème. Parmi le systèmes développés à partir de ces techniques, on peut citer GATES [Brazile et Swigger, 1988], Gate Manager [American Airlines, 1993] et RACES [Jung et al., 1997].

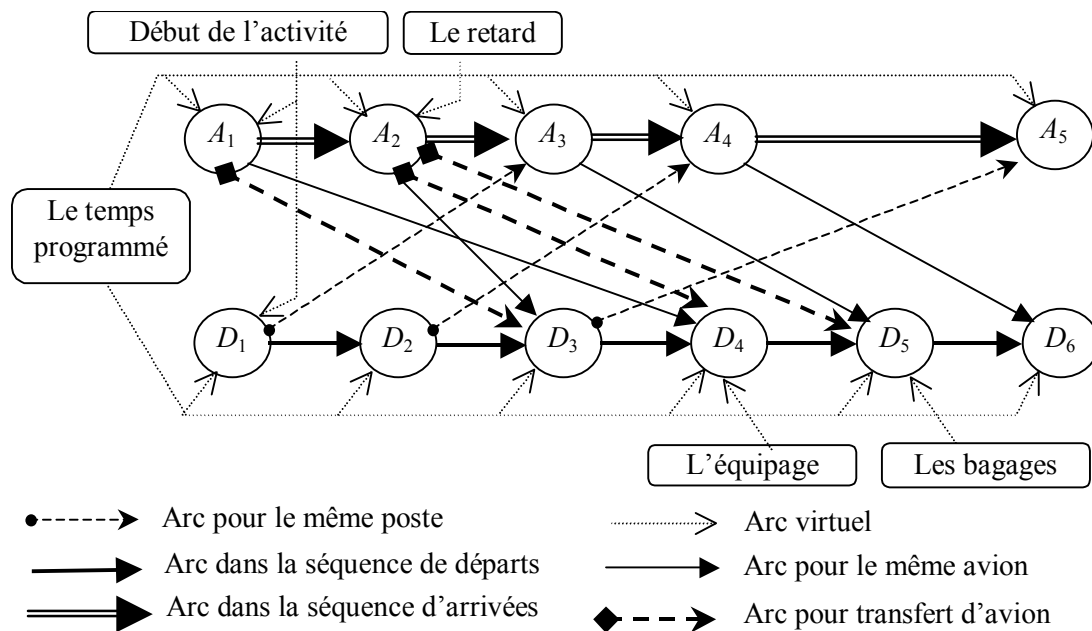
En général l'ensemble des contraintes est représenté sous une forme graphique (réseau d'activités, diagramme de Gantt) et il s'agit alors de trouver une solution performante qui satisfasse toutes les contraintes.

Un exemple de ceci est donné par le système à base de règles qui a été développé dans [Cheng, 1998a] afin de contrôler les mouvements des avions dans une zone de stationnement. L'activité des avions dans la zone de stationnement est modélisée par un réseau composé d'arcs et de nœuds, ce qui permet de représenter les séquences possibles d'activités et d'identifier les conflits.

Tous les facteurs qui affectent les avions aux postes et qui sont cause de retards sont exprimés par des arcs. Les chemins dans le graphe représentent des séquences réalisables d'opérations,

les nœuds représentent soit des activités associées aux avions, soit des conditions associées aux autres flux (passagers, bagages, équipages) concernés par cette opération.

Un exemple de réseau est donné sur la figure ci-dessous :



**Figure VII.4 Exemple de réseau d'activités au poste de stationnement**

Un ordonnancement nominal est réalisé en utilisant des techniques classiques d'ordonnancement [de Weerdt, 1999] puis un ensemble de règles de type « si-alors » est généré de façon à couvrir toutes les situations où une perturbation se produit : changement dans les horaires de départ ou d'arrivée, modification des durées de certaines opérations, introduction ou annulation de vols.

Une validation par simulation est souhaitable afin de vérifier la qualité des solutions proposées pour la gestion des affectations des postes de stationnement.

Dans le cas de RACES, un diagramme Gantt permet de représenter l'ensemble des contraintes, celles-ci sont considérées comme étant soit strictes, soit faibles, soit encore facultatives. Une heuristique considérant simultanément les retards et la classe des avions est alors mise en œuvre de façon à réaliser l'ordonnancement des activités dans la zone de stationnement. Celle-ci peut être relancée chaque fois que l'environnement du problème subit une modification, c'est ce qui donne son caractère réactif à RACES.

## VII.5 Le choix des cheminements (Problème G2 et G5)

Il s'agit de définir pour chaque avion un chemin entre son poste de stationnement et la piste de décollage ou entre la sortie de piste et un poste de stationnement. En général, le système de voies de circulation sera représenté par un graphe où peuvent coexister des arcs orientés et des arrêts correspondant à une circulation possible dans les deux sens d'un tronçon de voie.

Différents critères permettent de comparer l'ensemble des chemins qui relient l'origine et la destination d'un déplacement :

- la longueur du chemin,
- la durée prévue (déplacement et attentes intermédiaires),
- la complexité du chemin aussi bien du point de vue du pilote que du contrôleur,
- une combinaison des critères ci-dessous.

La longueur du chemin est le critère le plus facile à calculer. Il est donné par :

$$L_p = \sum_{\substack{u \in I_p \\ u \in U}} l_u$$

où  $U$  est l'ensemble des arcs et arêtes du graphe représentant les voies de circulation,  $I_p$  est l'ensemble des arcs ou arêtes qui constituent le chemin  $p$ ,  $l_u$  est la longueur de l'arc  $u$ .

La durée d'un itinéraire peut être donnée par :

$$D_p = \sum_{\substack{u \in I_p \\ u \in U}} (l_u / v_u + d_u)$$

où  $v_u$  est la vitesse moyenne de déplacement sur l'arc  $u$  et  $d_u$  la durée de l'attente à la sortie de l'arc  $u$ . La vitesse  $v_u$  dépend du type d'appareil considéré et des caractéristiques du segment de voie (sortie de piste, voie rectiligne, virage etc.), alors que la durée des attentes, qui dépend du trafic environnant et du système de contrôle de trafic, est difficile à prévoir.

La complexité du chemin dépendra de facteurs tels que le nombre de voies traversées (en distinguant les pistes des voies de circulation), le nombre et la nature des intersections et des virages rencontrés. L'évaluation de cette complexité pour le pilote et pour le contrôleur ne sera pas la même mais aura dans les deux cas un caractère qualitatif et global (il n'y a plus nécessairement d'addition des contributions à l'évaluation du chemin).

Deux types de méthodes de résolution de ce problème ont été développés :

- celles où le trafic environnant n'est pas considéré explicitement et
- celles où l'on tient compte explicitement de l'ensemble du trafic programmé sur cette période de temps.

### VII.5.1 Choix indépendant des cheminements

Dans ce cas on ne tient pas compte de l'influence du trafic sur les mêmes voies de circulation ou sur les voies concurrentes au niveau des intersections pour évaluer les trajets concurrents reliant la même paire origine-destination. Ceci revient à supposer que l'effet de trafic s'applique également sur tout les chemins, ce qui est rarement le cas. Par ailleurs, cette approche ne permet pas de tenir compte de l'effet des séparations minimales sur la vitesse de progression de l'avion le long d'un cheminement.

Le critère de durée, qui est le plus utilisé dans ce cas ci, se ramène simplement à :

$$D_p = \sum_{\substack{u \in I_p \\ u \in U}} l_u / v_u$$

Remarquons que si la vitesse d'avancement est uniforme pour un avion donné, on se ramène ici à une constante près au critère de distance minimale.

L'algorithme  $A^*$  [Pearl, 1990] décrit ci-dessous, permet alors de calculer le chemin de durée minimale et celui-ci entre deux sommets donnés du graphe.

Algorithme  $A^*$

$\mathcal{O} = \{s\}$ ,  $f(s) = 0$ ,  $g(s) = 0$

TANT QUE  $\mathcal{O} \neq \emptyset$

choisir  $k$  avec  $f(k)$  minimum

$\mathcal{O} = \mathcal{O} \setminus \{k\}$ ;  $\mathcal{T} = \mathcal{T} \cup \{k\}$

SI  $k \in \mathcal{T}$  ALORS

STOP //une solution a été trouvée

fin SI

$\mathcal{D} = \Gamma^+(k)$

POUR tous  $i \in \mathcal{D}$

SI  $i \notin \mathcal{O} \cup \mathcal{T}$  ALORS

$g(i) = g(k) + d(i, k)$ ;  $f(i) = g(i) + h(i)$

marquer  $k$  comme étant le père de  $i$

```
         $\mathcal{O} = \mathcal{O} \cup \{i\}$ 
    fin SI
fin POUR
fin TANT QUE
```

Si l'on considère des groupes des chemins possédant un sommet extrême commun (sorties de piste-postes de stationnement ou postes de stationnement-entrée de piste), l'algorithme de Dijkstra [Dijkstra, 1959] donné ci dessous, permet de calculer simultanément l'ensemble des chemins optimaux avec leur durée, puisque ici le sens de circulation n'a aucun effet sur le coût de déplacement :

Algorithme de Dijkstra

```
 $\mathcal{O} = \{s\}$ 
POUR tous  $i \in G$ 
     $w(i) = d(s, i)$ 
fin POUR
TANT QUE  $G \setminus \mathcal{O} \neq \emptyset$ 
    choisir  $k \in G \setminus \mathcal{O}$  avec  $w(k)$  minimum
     $\mathcal{O} = \mathcal{O} \cup \{k\}$ 
    POUR tous  $i \in G \setminus \mathcal{O}$ 
         $w(i) = \min(w(i), w(k) + d(k, i))$ 
    fin ROUR
fin TANT QUE.
```

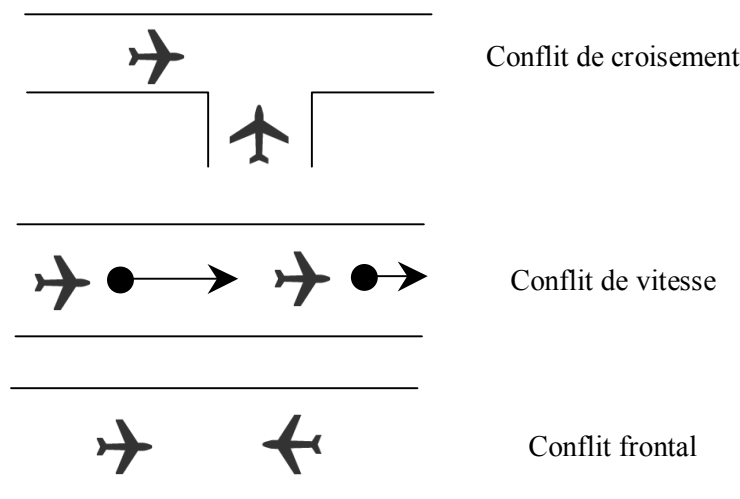
Il est clair que le chemin optimal obtenu suivant cette approche n'a qu'un caractère de référence et que l'ensemble des éléments du problème non pris en compte feront sûrement dévier la solution optimale de celle déjà obtenue ici. Il semble donc intéressant d'essayer de définir un ensemble de chemins alternatifs qui ne soient pas trop pénalisants suivant le critère des durées ou des distances, mais qui puissent être, du moins certains d'entre eux, plus robustes aux conditions opérationnelles.

Ainsi, par exemple, un algorithme d'énumération récursive mettant en œuvre l'algorithme de Dijkstra [Jimenez et Marzal, 1996] permet de calculer les  $k$  meilleurs chemins suivant le critère retenu au départ (durée ou distance).

On pourra aussi retenir l'ensemble des itinéraires pour lequel le coût associé est compris entre la valeur optimale nominale et cette valeur augmentée d'un certain pourcentage. Dans ce cas, il est possible d'utiliser un algorithme de type « branch and bound ».

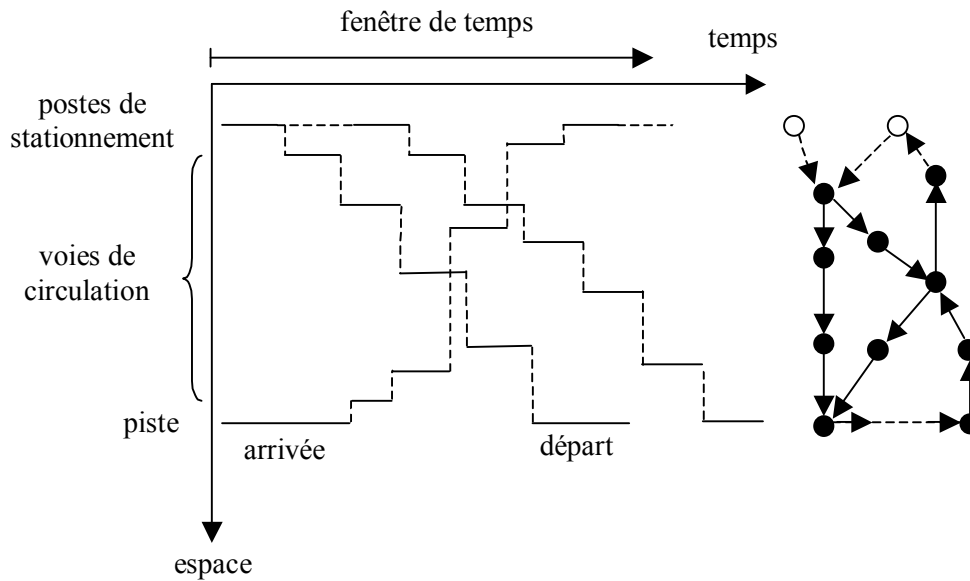
### VII.5.2 Choix coordonné de cheminements

En fait, en général le contrôleur ne choisit pas de façon indépendante les chemins des différents avions présents sur la plate-forme aéroportuaire, il le fait simultanément sur un ensemble d'aéronefs qui se présentent à la sortie des pistes ou dont le départ des postes de stationnement est programmé et affiché aux passagers. En effet, l'ensemble de ces aéronefs vont interagir entre eux et avec ceux qui sont déjà présents sur les voies de circulation. Il s'agira donc pour le contrôleur de fixer tous ces chemins en essayant de satisfaire globalement l'un des critères évoqués à la section précédente tout en tenant compte des normes de séparation entre avions et en évitant les situations de conflit. La figure VII.5 présente les principales situations de conflit rencontrées sur les voies de circulation d'un aéroport.



**Figure VII.5 Les principaux types de conflits sur les voies de circulation**

Dans ce cas, la représentation topologique du réseau de voies de circulation doit être abandonnée pour une représentation espace-temps. Ce type de représentation a déjà été utilisée par divers auteurs tels que [El Moudani et Mora-Camino, 2000] pour traiter le problème de l'affectation de la flotte d'une compagnie à ces vols programmés. Plus récemment, des auteurs comme [Marin et al., 2002], [Texeira et al., 1992] ont adopté cette représentation en considérant une fenêtre de temps discrétisée.



**Figure VII.6 Représentation espace-temps**

Plusieurs approches ont été proposées pour résoudre ce problème :

La plus simple et qui est la plus utilisée, consiste à appliquer une politique de type FCFS (first come, first served) aux avions prêts à quitter le poste de stationnement ou qui se présentent en sortie de piste pour rejoindre ces postes. En fait, tout est fait dans un cadre prévisionnel sur une fenêtre de 15 à 30 minutes (cette durée dépend des dimensions de la plate-forme aéroportuaire et de l'intensité du trafic) : heures prévues de désapontage des avions au départ, heure prévue d'atterrissage et de sortie de piste des avions en approche. La mise en œuvre d'une telle politique demande donc une coordination avec la gestion des départs aux postes de stationnement et le contrôle du trafic aérien en approche et en zone terminale. Il est clair que celle-ci n'est pas optimale puisque les choix en amont ne sont pas remis en question lorsqu'un conflit se présente avec un avion classé en aval. Par contre, il est possible d'utiliser les techniques développées dans le cadre du choix indépendant des cheminements et de tenir compte de tout autre critère de caractère plus qualitatif, le tout étant appliqué au graphe espace-temps où certains arcs sont déjà occupés sur certaines périodes.

Plusieurs auteurs ont proposé une approche d'optimisation en variables mixte (cas où le temps est pris continu) [Visser et Roling, 2000] ou en variables entières (cas où le temps a été discrétisé) [Marin et al., 2002]. Les méthodes d'affectation de trafic développées pour la circulation urbaine [Florian, 1976] ne s'appliquent pas ici compte tenu de la faiblesse des volumes de trafic considérés, par contre, ce problème a beaucoup de similarité avec celui de la gestion des terminaux ferroviaires [Ciufudean, 2002].

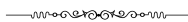
Une première critique à cette approche est que le critère d'optimisation étant global, certains avions pourront se retrouver, avec la solution qui est théoriquement optimale, extrêmement pénalisés. Ceci peut être évité mais au prix de l'introduction de contraintes supplémentaires dans la formulation du problème.

Les difficultés de cette approche sont aussi liées au caractère dynamique du problème qui doit être relancé dès qu'un nouvel avion prétend exercer des activités de circulation dans la fenêtre temporelle courante. Ainsi diverses heuristiques ont été proposées de façon à diminuer la complexité du problème et à proposer des solutions évolutives.

Une autre approche [Gotteland et al. 2001] travaillant directement sur une population de chemins possibles pour toutes les paires origines-destinations, a mis en œuvre les techniques de calcul par algorithmes génétique. Dans ce cas, la fonction d'évaluation des solutions (les individus d'une génération) est une fonction croissante du nombre de conflits. Cette méthode dont la qualité des résultats dépend très fortement de l'ensemble des trajectoires générées a priori, peut produire des résultats meilleurs que la méthode FCFS en ce qui concerne le critère de temps total de roulage au sol des avions [Gotteland, 2004].

## VII.6 Conclusion

Pour les différents problèmes de décision considérés ici dans le cadre de la gestion des mouvements des avions sur les plate-formes aéroportuaires, il s'agit en général de résoudre de façon nominale dans un environnement déterministe un problème d'ordonnancement des activités assignées à chaque avion au cours de ses manœuvres d'arrivée ou de départ. Malgré les nombreuses simplifications adoptées dans la formulation de ces problèmes, on se trouve en général face à des problèmes de classe de complexité (on fait référence ici à la théorie de la complexité algorithmique [Prins et al., 2003]) qui ne permet pas d'envisager l'obtention d'une solution mathématiquement exacte dans un temps garanti compatible avec le temps de réponse attendu dans le cadre de la planification opérationnelle (quelques minutes). Ceci a conduit au développement de méthodes heuristiques basées aussi bien sur une optimisation locale (méthodes gloutonnes) que sur une optimisation globale (algorithmes génétiques).





# **Chapitre VIII – Une approche adaptative pour la gestion de mouvements au sol des avions**

## **VIII.1 Introduction**

Dans ce chapitre final, on aborde le problème de la synthèse d'un système d'aide à la décision dans un cadre de planification opérationnelle destiné à définir les itinéraires (routes et instants de début des manœuvres) associés à chaque vol programmé aussi bien à l'arrivée qu'au départ. La démarche scientifique retenue ici est d'abord d'analyser une approche nominale de ce problème, purement basée sur la programmation mathématique et d'en identifier les limitations et les lacunes face au contexte opérationnel. Dans le cadre de la saturation, celui-ci est caractérisé par la présence de files d'attente. Ainsi, une approche d'optimisation d'un réseau de files d'attente représentant mieux les conditions opérationnelles du trafic est développée. Le cadre opérationnel fournit alors des éléments pour la résolution heuristique de ce problème.

## **VIII.2 Approche de résolution directe par la Programmation Mathématique**

Différents auteurs tels que [Smeltink et al., 2003], [Marin et al., 2002] ont traité le problème de la gestion de la circulation au sol des avions dans le cadre de la Programmation Mathématique. On analyse ici le premier d'entre eux.

### **VIII.2.1 La modélisation retenue**

Pour cela, il est supposé que l'ensemble des voies de circulation est représenté par un graphe orienté  $G=[X,U]$  où chaque nœud est associé à une intersection de voies de circulation, les arcs représentent les voies les reliant.

A chaque avion  $a \in A = \{1, \dots, n_A\}$  est associé une route  $R_a$  composée d'une suite d'arcs orientés  $(u_1^a, \dots, u_{k_a}^a)$ , où les  $u_i^a$  sont les sommets de  $G$  et les paires  $(u_i^a, u_{i+1}^a)$  des arcs de  $G$ . L'ensemble  $A$  est composé de  $A^{Arr}$  et de  $A^{Dep}$ , les ensembles des avions à l'arrivée et au départ.

On introduit pour chaque route associée à un avion  $a$ , l'instant  $t_{au}$  où l'avion  $a$  devrait atteindre le sommet  $u$ , le temps étant supposé s'écouler de façon continue.

Afin de caractériser l'ordre de passage des avions par les sommets du graphe, deux types de variables binaires sont introduites :

- $y_{abu}$  : qui est égale à 1 si l'avion  $a$  passe par le sommet  $u$  *juste avant* l'avion  $b$ , et qui est égale à zéro sinon,
- $z_{abu}$  : qui est égale à 1 si l'avion  $a$  passe par le sommet  $u$  *avant* l'avion  $b$ , et qui est égale à zéro sinon.

Un avion fictif est introduit dans  $A$ , l'avion  $o$ , qui précédera sur chaque nœud le premier avion passant par lui et qui suivra le dernier avion passant par lui.

### VIII.2.2 Le problème d'optimisation proposé

Le problème d'optimisation revient alors à minimiser le critère suivant associé à la somme des différents retards :

$$C = \sum_{a \in A^{Dep}} (TD_a - t_{au_1}) + \sum_{a \in A^{Arr}} (t_{au_{k_a}} - t_{au_1})$$

qui comprend la durée totale du roulage pour le décollage et la durée totale du roulage à l'arrivée.

Un ensemble de contraintes relativement complexe est alors introduit :

a)

$$\sum_{a \in A \cup \{o\}} y_{abu} = 1, \forall b \in A \cup \{o\}, \forall u \in R_a \cap R_b$$

$$\sum_{b \in A \cup \{o\}} y_{abu} = 1, \forall a \in A \cup \{o\}, \forall u \in R_a \cap R_b$$

qui indiquent que chaque avion n'a qu'un seul prédécesseur immédiat et qu'un seul successeur immédiat au passage du sommet  $u$ .

b)

$$t_{bu} > y_{abu}t_{au}, \forall a, b \in A, a \neq b, \forall u \in R_a \cap R_b$$

$$t_{au} > y_{obu}t_{bu}, \forall a, b \in A, a \neq b, \forall u \in R_a \cap R_b$$

$$t_{au} > y_{aou}t_{bu}, \forall a, b \in A, a \neq b, \forall u \in R_a \cap R_b$$

qui imposent aux variables temporelles des valeurs cohérentes avec l'ordre de passage retenu aux nœuds.

c)

$$z_{abu} \geq y_{abu}, \forall a, b \in A \cup \{o\}, a \neq b, \forall u \in R_a \cap R_b$$

$$z_{bau} \geq y_{obu}, \forall a, b \in A \cup \{o\}, a \neq b, \forall u \in R_a \cap R_b$$

$$y_{obu} + z_{abu} \leq 1, \forall a, b \in A \cup \{o\}, a \neq b, \forall u \in R_a \cap R_b$$

$$z_{bau} \geq y_{aou}, \forall a, b \in A \cup \{o\}, a \neq b, \forall u \in R_a \cap R_b$$

$$y_{aou} + z_{abu} \leq 1, \forall a, b \in A \cup \{o\}, a \neq b, \forall u \in R_a \cap R_b$$

$$z_{cbu} \geq y_{abu} + z_{cou} - 1, \forall a, b, c \in A \cup \{o\}, a \neq b \neq c, \forall u \in R_a \cap R_b \cap R_c$$

qui imposent aux variables représentant les ordres de passage de prendre des valeurs binaires cohérentes entre-elles.

d)

$$t_{au} + d_{auv}^{\min} \leq t_{av} \leq t_{au} + d_{auv}^{\max}, \forall (u, v) \in R_a, a \in A$$

qui impose à l'avion de se déplacer avec une vitesse comprise entre sa valeur minimale et sa valeur maximale.

e)

$$z_{abu}t_{bu} \geq z_{abu}(t_{au} + (t_{av} - t_{au})Sep_{ab} / l(u, v)), \forall a, b \in A, a \neq b, \forall u \in R_a \cap R_b$$

où  $Sep_{ab}$  est la séparation minimale admissible entre les avions  $a$  et  $b$ ,  $l(u, v)$  est la longueur de l'arc  $(u, v)$ , cette contrainte assure la séparation minimale en temps entre deux avions consécutifs au passage du sommet  $u$ .

f)

$$z_{abu} - z_{abv} = 0, \forall a, b \in A, \forall (u, v) \in R_a \cap R_b$$

$$z_{abu} - z_{abv} = 0, \forall a, b \in A, \forall (u, v) \in R_a \text{ avec } (u, v) \in R_b$$

qui empêchent les dépassements d'avions sur un même trajet.

Un ensemble additionnel de points d'attente,  $A^{Att}$ , a été introduit de façon à représenter les positions d'attente au voisinage des entrées/sorties de piste et des positions de stationnement, ce qui conduit à introduire des contraintes logiques supplémentaires :

$$t_{au_1} = TA_a, \forall a \in A^{Arr}, t_{au_1} \geq TS_a, \forall a \in A^{Dep}, t_{au_{k_a}} \leq TD_a, \forall a \in A^{Dep}$$

qui indiquent que dès la fin de son atterrissage (l'instant  $TA_a$ ) un avion commence à circuler sur les voies de circulation, qu'un avion ne peut commencer son repoussage avant l'heure programmée ( $TS_a$ ) et ne peut finir de circuler après l'heure prévue de décollage ( $TD_a$ ).

### VIII.2.3 Résultats et analyse

Par majoration les contraintes non-linéaires de cette formulation peuvent être linéarisées et l'utilisation directe de CPLEX permet alors de résoudre ce problème. Les résultats numériques présentés dans [Smeltink et al., 2003] indiquent que seuls des problèmes avec au plus vingt avions dans le système peuvent être traités dans un temps acceptable (quelques minutes de calcul). Ceci est largement insuffisant pour la plupart des aéroports d'importance et l'introduction d'un horizon glissant comprenant un nombre limité de mouvements a été étudiée. Une étude nominale, effectuée avec des données de l'aéroport de Schiphol semble conduire à des résultats plus optimistes.

Néanmoins, dans ce travail, comme dans plupart des publications équivalents, rien n'est dit sur la manière de mettre en œuvre opérationnellement cette approche. Cette mise en œuvre semble bien difficile car le contrôleur ne pourra pas imposer au pilote des temps de passages en différents points de la plate-forme aéroportuaire sans tenir compte de la situation réelle.

En fait, outre la route, la seule chose que le contrôleur peut dans une certaine mesure imposer au pilote, c'est l'instant de sortie de poste de stationnement, et encore, s'il n'y a pas de conflit dans sa zone de manœuvre. Dans le modèle proposé ci-dessus les files d'attente ne sont pas considérées de façon explicite, or l'existence et la taille de celles-ci ont des conséquences non négligeables sur les évolutions des avions au sol et notamment sur la durée et la consommation associées à leurs déplacements.

Finalement, compte tenu de la lourdeur des calculs à mettre en œuvre qui est due à la multiplication des variables binaires et des contraintes associées dans la formulation retenue,

cette approche ne peut être rendue réactive, les routes seront fixées une fois pour toute et les instants nominaux de passage une fois calculés, resteront figés.

### **VIII.3 Quelques éléments de réflexion**

Plusieurs observations peuvent être faites sur les carences des méthodes déjà étudiées.

La formulation des problèmes, pour être rendue accessible aux logiciels de programmation mathématique standards, est souvent incomplète et simplifiée de façon exagérée :

- l’approche est mono critère et s’applique uniformément à tous les avions,
- les files d’attente sont ignorées,
- la capacité des différentes voies de circulation n’est pas considérée, seule la conservation des flux étant en général assurée,
- la formation de pelotons d’avions avançant les uns derrière les autres n’est pas considérée et les vitesses d’avancement sont supposées constantes,
- les perturbations associées à la distribution des durées des opérations de manœuvre aux postes et à la dispersion des instants d’arrivée des avions en sortie de piste, ne sont pas considérées.

Ceci rend illusoire une approche nominale qui serait basée sur l’évitement de conflits entre avions, à moins que des marges d’incertitude, pénalisante du point de vue de la capacité, soient introduites.

Certaines considérations tactiques favorables au bon écoulement du trafic ne sont pas intégrées ni dans le modèle, ni dans le processus de résolution :

- les avions à l’arrivée doivent avoir une certaine priorité pour circuler bien au delà des sorties des pistes et éviter de bloquer celles-ci,
- les avions aux postes doivent être libérés dès que possible s’ils ont une perspective de se diriger vers la piste de décollage avec un minimum d’attente en cours de déplacement, sinon, le problème reste entier,

- la capacité des pistes utilisées simultanément pour l’atterrissage et le décollage est maximisée lorsque des trains d’avions au décollage sont intercalés entre des trains d’avions à l’atterrissage,
- en période de saturation, des files se forment aux intersections des voies de circulation et en tête de piste, les premières contribuent à la formation de pelotons d’avions avec des manœuvres répétées d’avance-arrêt-attente-avance,
- le nombre de chemins utilisés effectivement par les contrôleurs sont en nombre assez réduit car ils obéissent à des critères multiples d’acceptabilité. Ils sont mémorisés par les contrôleurs ce qui permet au contrôleur d’être réactif aux situations qui se créent et donc proposent en ligne des nouvelles solutions. Suite à une situation nouvelle (incident technique, réévaluation de la situation), le contrôleur peut décider de modifier le chemin suivi par un ou plusieurs avions.

D’autres considérations peuvent être faites quant à l’utilisation des informations issues des études de capacité et de l’expérience antérieure d’opération :

- si les flux horaires annoncés à l’arrivée et au départ, se trouvent au voisinage de la frontière de Pareto de la capacité, on peut s’attendre à un comportement très chaotique du trafic au sol, par contre si on en est loin, au niveau du planning des opérations, on pourra négliger dans une première phase les interactions entre avions. Ainsi, la relation à la capacité permettra d’identifier la situation de trafic en terme de degré de saturation,
- la distribution optimale des flux dans le réseau, associée aux flux horaires annoncés à l’arrivée et au départ, dans le cadre du modèle d’évaluation de la capacité pratique du chapitre VI, pourra permettre d’identifier les principaux chemins à utiliser et de quantifier les coûts marginaux associés à leur traversée,
- si le réseau de voies de circulation est préexistant, des statistiques permettant de relier la distribution des flux et les chemins empruntés aux retards encourus par les avions aussi bien à l’arrivée comme au départ, doivent être disponibles.

Face aux limitations des approches purement mathématiques exposées plus haut et face aux dernières considérations, une nouvelle approche pour la gestion des mouvements des avions au sol est proposée dans les paragraphes suivants.

## VIII.4 Une nouvelle approche pour la gestion des mouvements au sol des avions

On a vu qu'il était illusoire d'essayer coûte que coûte d'imposer à l'avance un timing très serré aux avions circulant au sol compte tenu des forts aléas rencontrés. On se limitera donc ici à proposer une solution au problème du choix de la route au sol de chaque avion associé au choix de l'instant de démarrage dans le cas des départs (pour les avions à l'arrivée, cet instant est une donnée exogène au problème traité ici). Le problème est ici divisé en plusieurs étapes :

- sélection des routes possibles
- évaluation des coûts associés
- choix d'un itinéraire.

Le terme « route » est réservé ici à un chemin (2D) dans le graphe représentant les voies de circulation au sol et le terme « itinéraire » est réservé à un doublet (2D+T) comprenant une route et l'instant prévu de démarrage du déplacement sur celle-ci.

### VIII.4.1 Sélection des routes possibles

Tout d'abord, remarquons que le support de l'ensemble des routes possibles pour une avion constitue un fuseau. On définit ici un fuseau comme un graphe orienté sans circuit reliant une unique source à un unique puits.

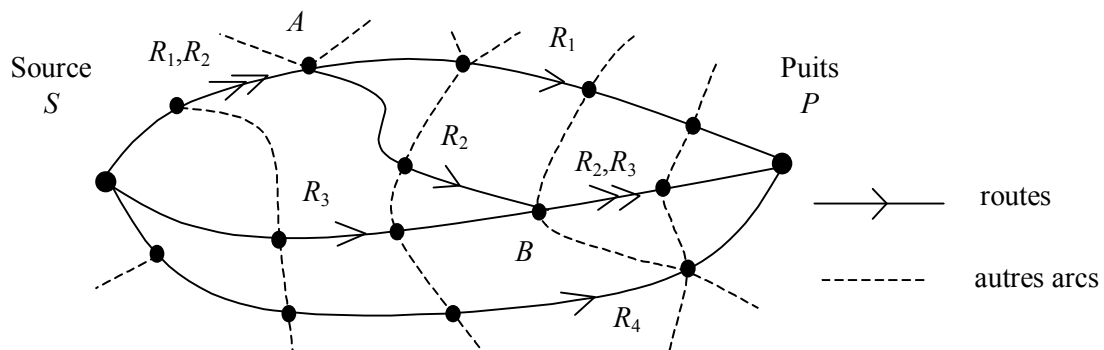


Figure VIII.1 Fuseau des routes possibles pour une paire origine-destination

Par exemple, sur la figure VIII.1 est représenté le cas de trois routes associées à un vol, on remarquera que ces routes ont des parties communes et donc qu'il n'est pas nécessaire de choisir entre des routes différentes, tant que l'on reste dans leur partie commune initiale (exemple entre  $S$  et  $A$  pour les routes  $R_1$  et  $R_2$ ).

Ainsi, étant donné l'exemple  $F=\{R_1, R_2, R_3, R_4\}$ , en  $S$  il est nécessaire de choisir entre  $R_1$  ou  $R_2$ ,  $R_3$  et  $R_4$ . Si la première option a été retenue en  $S$ , il n'est pas nécessaire de choisir entre  $R_1$  et  $R_2$  avant que l'avion n'a pas atteint le point  $A$ . Cela peut être intéressant car durant le trajet entre  $S$  et  $A$ , des nouvelles informations peuvent apparaître sur les conditions comparatives de circulation sur les chemins  $\overline{AP}$  par  $R_1$  et  $\overline{AP}$  par  $R_2$ , ceci peut donc ménager une certaine flexibilité au contrôleur pour répondre aux conditions évolutives du trafic.

Si l'on considère la journée comme la période naturelle d'opération, un avion pourra intervenir plus d'une fois dans les opérations de circulation au sol (arrivée-débarquement/embarquement-départ, allers-retours pour une navette), il faut donc associer les routes aux vols et non aux avions. Soit donc  $V$  l'ensemble des vols considérés, on a :

$$V = V^A \cup V^D$$

où  $V^A$  est l'ensemble des vols à l'arrivée et  $V^D$  est l'ensemble des vols au départ. Si l'on se restreint aux opérations commerciales de l'aviation civile, les horaires programmés de ceux-ci sont disponibles. On peut donc les associer à une plage horaire et à une charge nominale du réseau.

Si la structure du réseau est simple (très peu ou pas de choix de routes alternatives), le problème est trivial, sinon se pose le problème de la construction de l'ensemble de ces routes par des méthodes algorithmiques d'évaluation, de comparaison et de sélection.

Il s'agit alors de diviser la période d'opération en intervalles de temps pour lesquels les conditions de trafic (nombre moyen d'arrivées/départs par périodes de temps – une demi heure par exemple) restent à peu près similaires.

Ensuite, le problème de l'affectation optimale des flux dans le réseau des voies de circulation, étudié au chapitre VI peut être reconsidéré dans une version où les flux dans les arcs sont remplacés par les circulations sur les chemins. Pour cela, à chaque paire origine-destination,



on associe un ensemble de chemins possibles les reliant, en nombre beaucoup plus grand que le nombre de routes qui seront finalement retenues, on a donc :

$$\varphi_u = \sum_{ij \in OD} \sum_{k \in K_{ij}} a_{ij}^{uk} h_{ij}^k, \forall u \in U$$

où  $U$  est l'ensemble des arcs,  $OD$  est l'ensemble des paires origine-destination,  $K_{ij}$  est l'ensemble des chemins possibles reliant la paire  $ij$ ,  $a_{ij}^{uk}$  est égal à 1 si l'arc  $u$  appartient au  $k^{\text{ième}}$  chemin entre  $i$  et  $j$ ,  $a_{ij}^{uk}$  est égal à zéro sinon,  $h_{ij}^k$  est la circulation empruntant le  $k^{\text{ième}}$  chemin entre  $i$  et  $j$ .

Les ensembles  $K_{ij}$ ,  $ij \in OD$ , peuvent être obtenus par exemple en recherchant tous les chemins dont la longueur n'excède pas la longueur minimale entre  $i$  et  $j$  de plus d'un certain pourcentage  $\lambda$  ( $\lambda=30\%$  par exemple). Ceci peut être réalisé a priori, puisque l'on ne considère pas encore le chargement du réseau de trafic. Remarquons que  $\lambda$  peut être suivant le cas, soit un paramètre uniforme pour l'ensemble des paires origine-destination, soit un paramètre variable en fonction de la nature de celles-ci.

Afin d'éviter d'avoir à résoudre à nouveau, dans cette nouvelle version, le problème de l'affectation optimale des flux, une solution plus directe est de résoudre le problème quadratique, noté  $P_Q(\varepsilon)$ , non contraint, suivant :

$$\min_{[h]} \varepsilon([h])$$

avec

$$\varepsilon([h]) = \sum_{u \in U} \left( \varphi_u^* - \sum_{ij \in OD} \sum_{k \in K_{ij}} a_{ij}^{uk} h_{ij}^k \right)^2$$

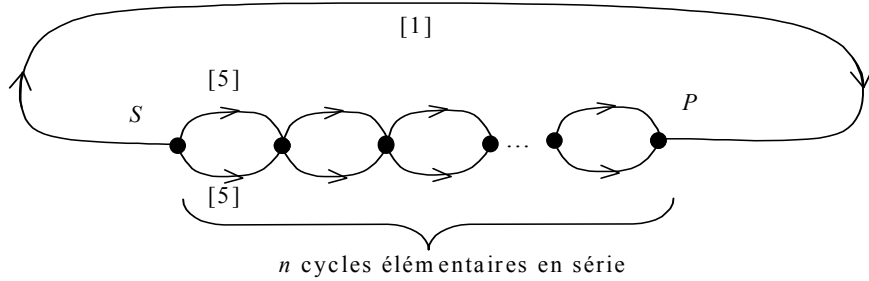
où  $[h]$  est l'ensemble des circulations sur tous les chemins considérés,  $\{\varphi_u^*, u \in U\}$  est la solution du problème  $P_{op}(\Phi^a, \underline{N}^0, \Phi^d)$  où  $\Phi^a$  et  $\Phi^d$  sont les flux associés aux conditions de trafic de référence pour l'intervalle de temps considéré.

Ce problème comporte plusieurs solutions optimales. Ceci met en évidence l'existence des multiples possibilités de distribution du flux optimum parmi les circulations traversant un arc. Si la solution de ce problème ne conduit pas à une valeur proche de zéro pour  $\varepsilon([h])$ , il s'agira de relaxer un peu plus la longueur des chemins considérés en augmentant la valeur de  $\lambda$ , jusqu'à ce que cette condition soit satisfaite.

En général, si le nombre de chemins générés est très grand, le flux total entre une origine et une destination sera très dispersé avec des circulations très faibles sur certains chemins et il ne sera pas envisageable de retenir tous ceux qui ont une circulation strictement positive.

La sélection des routes possibles ne se fera pas alors directement sur les circulations associées à chacun des chemins, mais plutôt sur les flux associés aux arcs du fuseau résultant de la solution du problème  $P_Q(\varepsilon)$ .

Par exemple, si l'on considère la situation représentée sur la figure VIII.2, un critère de sélection basé uniquement sur la circulation sur chaque chemin éliminerait des solutions intéressantes :



**Figure VIII.2 Sélection des chemins**

Sur cette figure, il y a  $2^n+1$  chemins de circulation non nulle, le chemin le plus long, de circulation  $h=1$  serait retenu au détriment de  $2^n$  autres chemins qui sont plus courts et qui ont une circulation de  $10/2^n$  si  $n$  est grand. Par exemple pour  $n=10$ , le rapport entre la circulation sur le premier chemin et les  $2^n$  autres serait supérieur à  $1/100$ , ce qui fausserait complètement le résultat de la sélection. Ainsi, sur le schéma ci-dessus, suivant le seuil fixé, on retiendrait soit les  $2^n+1$  chemins, soit  $2^n$  chemins, comme routes possibles entre  $S$  et  $P$ .

Les routes retenues peuvent être alors classées de différentes manières :

- par longueur croissante,
- par coût généralisé croissant, où le coût généralisé associé à la route  $r$  est donné par (voir chapitre VI.4.3) :

$$C_R = \sum_{u \in R_a^r} \left( l_u + \sum_{l \in R_l^r} \sum_{\substack{v \in \omega^-(l) \\ v \neq u}} c_{uv} \varphi_v^* \right)$$

où  $R_a^r$  est l'ensemble des arcs composant la route  $r$ ,  $R_i^r$  est l'ensemble des intersections disposées le long de la route  $r$ .

- par degré de liberté  $d_r^0$ , celui-ci étant donné par exemple par :

$$d_r^0 = \prod_{l \in R_i^r} d_l^+$$

où  $d_l^+$  est le demi-degré positif associé à la  $l^{\text{ième}}$  intersection rencontre sur la route  $r$  et calculé sur le fuseau  $F_r$  qui lui est associé. Pour la figure VIII.1 on a par exemple :

$$d_1^0 = d_2^0 = 2 \text{ et } d_3^0 = d_4^0 = 1.$$

Suivant la situation de trafic, l'un ou une combinaison de ces critères, pourront être retenus.

Le fuseau  $F_v$  associé au vol  $v$  sera alors déterminé de la façon suivante :

Pour un vol à l'arrivée, si  $[TA_v, TA_v + \delta_{A_v}]$  (où  $\delta_{A_v}$  est un intervalle de temps majorant minimal de la durée de l'opération d'arrivée) est entièrement compris dans un intervalle de temps associé à un trafic de référence, on adoptera le faisceau calculé pour cet intervalle et pour cette, même paire origine (piste) – destination (poste de stationnement). Sinon, s'il débordé sur un autre intervalle de temps, afin de ne rejeter aucune possibilité intéressante et en tenant compte du fait qu'il y aura un grand degré de recouvrement, on adoptera comme faisceau, l'union des faisceaux calculés pour ces deux intervalles consécutifs de temps. Une procédure similaire sera adoptée pour les faisceaux des avions au départ.

## VIII.4.2 Evaluation des coûts associés aux différentes routes

Cette évaluation doit être menée, afin d'être significative, dans des conditions aussi proches de la réalité que possible, et pour cela, sur une période de temps commençant à l'instant courant.

### VIII.4.2.1 Structure temporelle et stratégie retenues

Afin de tenir compte de l'état réel du trafic et de la politique de contrôle du trafic mise en œuvre, on est alors amené à résoudre à chaque instant (le temps doit être discrétisé par périodes de quelques minutes,  $\Delta T$ , de l'ordre de 1 à 2 minutes, ce qui correspond à la durée

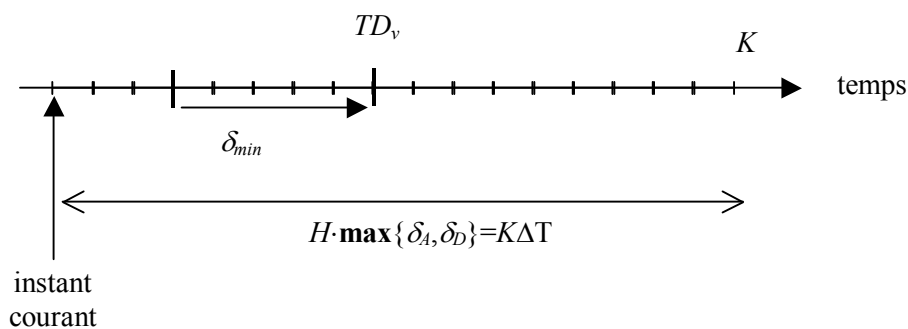
d'une opération élémentaire telle qu'un repoussage, un croisement de voies etc.) un problème de gestion optimale de files d'attente dans le réseau des voies de circulation au sol et sur une période au moins égale à plusieurs fois ( $H$ ) la durée totale maximale d'une opération au sol (départ ou arrivée) afin d'éviter les distorsions dues à la non prise en compte éventuelle des conséquences sur le trafic futur.

Remarquons aussi que dans le cas des départs le choix de la route et de l'instant de désapontage devront être déterminés avec un délai minimum  $\delta_{min}$  avant l'heure de départ publiée du vol, même si seule cette heure est communiquée à l'équipage de l'avion dans un premier temps. Ainsi, si  $TD_v$  est l'heure programmée de départ du vol  $v$ , le choix de son itinéraire (route et heure prévue de désapontage) devra être effectué idéalement quelques instants avant l'instant  $TD_v - \delta_{min}$ .

En ce qui concerne l'instant d'arrivée des avions en sortie de piste, celui-ci bien que dépendant de la gestion du trafic aérien dans la TMA, peut être prédit avec une bonne précision sur une période de quelques dizaines de minutes. Ceci laisse le temps d'effectuer le choix de la route affectée à ce vol incident vers son poste de stationnement.

Remarquons aussi que jusqu'à cet instant de calcul, il sera toujours loisible de retoucher le fuseau des routes possibles  $F_v$  associées à ce vol pour tenir compte de la situation opérationnelle des voies de circulation (fermeture temporelle d'une section, limitation de vitesse sur une section etc.).

On a donc l'échelle suivante de temps :



**Figure VIII.3 Structure temporelle considérée**

A ce stade de l'analyse, une approche telle que celle présentée en chapitre VIII.2 serait possible, mais on a déjà discuté de ses limites. Ainsi, l'approche retenue ici essaye de prendre en compte les principaux phénomènes de trafic (les files d'attente) tout en évitant l'écueil de la complexité des problèmes d'optimisation à résoudre :

- tout d’abord un problème de gestion des files d’attente du réseau sur un horizon fuyant est proposé,
- puis de sa solution seront déduits, au fur et à mesure, les itinéraires des vols à l’arrivée et au départ.

### VIII.4.2.2 Le problème de gestion des files d’attente

On considère donc le problème d’optimisation, à résoudre à chaque instant courant  $k$  :

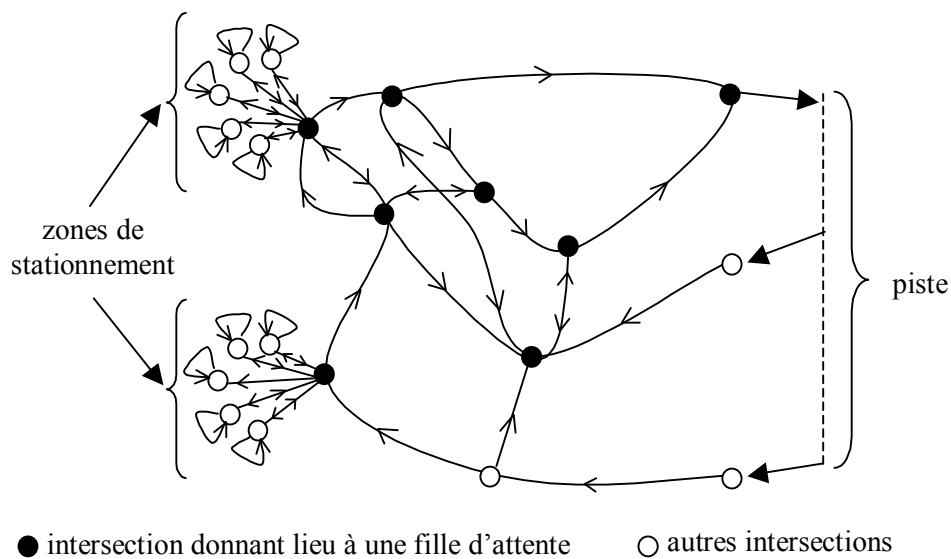
$$\min \sum_{k=k_0}^{k_0+H} \sum_{j \in L_J} \sum_{m \in Q_j} \lambda_{jk}^m q_j^m(k)$$

où  $k$  est le nombre de périodes élémentaires considérées,  $L_J$  est l’union des intersections présentes sur tous les faisceaux associées aux vols effectuant entièrement leur opération au sol (arrivée ou départ) sur l’horizon d’optimisation courant (on parle de fenêtre glissante)  $[t, t+k\Delta T]$ .

Ce critère permet d’évaluer les attentes totales à l’arrêt pondérées par le degré de criticité de la file.

L’union des faisceaux associés aux routes déjà sélectionnées (voir chapitre VIII.4.1) formera le support pour traiter le problème de la gestion des files d’attente.

La figure VIII.4 en donne un exemple :



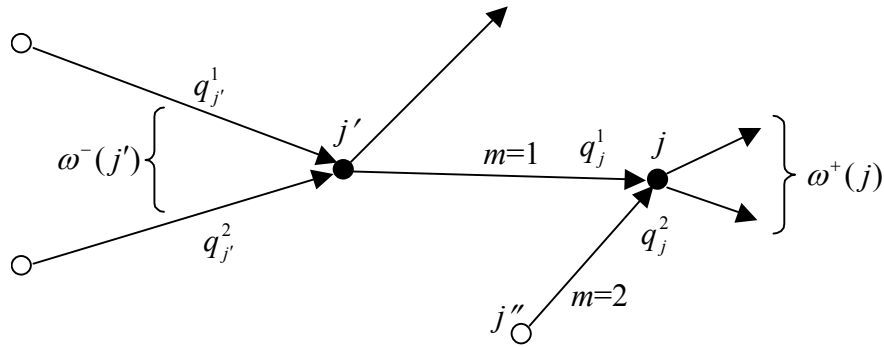
**Figure VIII.4 Représentation du réseau support pour la gestion prévisionnelle des file d’attente**

$Q_j$  est l'ensemble des files d'attente associées à l'intersection  $j$  et  $q_j^m(k)$  est la taille de la  $m^{\text{ième}}$  file incidente à l'intersection  $j$  à la période  $k$  et  $\lambda_{jk}^m$  est une pondération associée à celle-ci.

Par exemple, une attente au poste de stationnement, moteurs éteints, sera moins pénalisée qu'une attente, moteurs en fonctionnement, à l'entrée d'une voie de circulation.

Cette pondération dépendra aussi de la criticité de la voie compte tenu de l'intervalle de temps de référence (situation de trafic) et devra diminuer dans le temps, compte tenu de la décroissance de la précision des prévisions des flux d'arrivée et de départ avec celui-ci.

La figure VIII.5 permet de préciser la nature des contraintes associées à la dynamique des files d'attente :



**Figure VIII.5 Structure du réseau de files d'attente (notations)**

Les contraintes retenues sont alors les suivantes :

Equations d'état :

$$q_j^m(k) = q_j^m(k-1) + a_j^m(k) - d_j^m(k), j \in L_j, m \in Q_j, k = k_0, \dots, k_0 + H$$

avec la contrainte de positivité et la contrainte de capacité :

$$0 \leq q_j^m(k) \leq Q_j^{m \max}$$

où  $Q_j^{m \max}$  est la taille maximale que peut prendre la  $m^{\text{ième}}$  file incidente à l'intersection  $j$  notée  $(j, m)$ ,

$a_j^m(k)$  est le nombre d'avions arrivant dans la file  $(j, m)$  pendant la période  $k$  et  $d_j^m(k)$  est le nombre d'avions quittant cette même file pendant la même période :

$$a_j^m(k) = \sum_{i \in \omega^-(j')} x_{j'}^{im}(k - d_{j'j})$$

$$d_j^m(k) = \sum_{i \in \omega^*(j)} x_j^{mi}(k)$$

$$\forall j \in L_J, m \in Q_j$$

$$\text{où } \omega_m^*(j) \subset \omega^+(j), \omega_m^-(j) \subset \omega^-(j).$$

Ces sous ensembles d'arcs entrant ou sortant d'un sommet  $j$ , sont tels qu'il n'est pas possible d'effectuer des circuits sur le groupe associé aux routes retenues. On supposera aussi qu'au niveau des intersections donnant lieu à des files d'attente, sauf au voisinage des postes de stationnement, il n'y a pas dispersion des flux ( $\text{card}(\omega_m^*(j)) = 1$ ), et où  $d_{j'j}$  est le délai nécessaire (en nombre entier de périodes) pour parcourir l'arc  $(j'j)$  et  $x_j^{mi}(k)$  est le nombre d'avions quittant la  $m^{\text{ième}}$  file d'attente incidente à l'intersection  $j$  pour aller sur la  $i^{\text{ème}}$  sortie.

Les variables de décision sont supposées binaires :

$$x_{j'}^{im}(k) \in \{0,1\}, \forall j \in L_J, m \in Q_j, i \in Q_{j'}, k \geq 0$$

Ces débits doivent satisfaire des conditions de disponibilité :

$$\sum_{m \in \omega^*(j')} x_{j'}^{im}(k) \leq q_{j'}^i(k-1), j' \in L_J, i \in Q_{j'}, k = k_0, \dots, k_0 + H$$

et de capacité :

$$\sum_{i \in \omega^-(j')} \sum_{m \in \omega^*(j')} x_{j'}^{im}(k) \leq c_{j'}, j' \in L_J, k = k_0, \dots, k_0 + H$$

Les conditions initiales sont données par :

$$q_j^m(k_0), j \in L_J, m \in Q_j$$

$L_J$  peut être partitionné en :

$$L_J = L_S \cup L_{P_E} \cup L_{P_S} \cup L_I \cup L_D$$

Où  $L_S$  est l'ensemble des postes de stationnement (s'ils sont pris individuellement, on aura

$$Q_j^{1max} = 1, j \in L_S).$$

$$\sum_{i \in \omega_1^*(j)} x_j^{1i}(k) = 0, \forall k \in \{k_{d_{jl}} - D_{S_j}, \dots, k_{d_{jl}}\}$$

$$q_j^1(k) = 1$$

$$\sum_{k=k_{a_{jl}}}^{k_{a_{jl}} + \delta_d^{max}} \sum_{m \in \omega^*(j)} x_j^{1m}(k) = 1$$

où  $k_{d_{jl}}$  est le  $l^{i\text{ème}}$  départ programmé du poste  $j$ ,  $D_{S_j}$  est la durée d'occupation du poste de stationnement par l'avion qui effectue ce vol,  $\delta_d^{max}$  est le retard maximal admis au départ du poste.

$L_{P_E}$  est l'ensemble des points de sortie de piste, dans ce cas les  $a_j^1(k)$ ,  $j \in L_P, k = k_0, \dots, k_0 + H$  sont des données exogènes.

Se fixant un temps maximum de déplacement  $\tau_{jl}^{max}$  entre la sortie de piste et le poste de stationnement visé  $h$ , supposant aussi que la durée d'occupation de poste est supérieure à la durée de déplacement supplémentaire, on a :

$$x_j^{1l}(k_{a_{jl}}) = 1$$

et

$$q_h^1(k) = 1, \forall k \in \{k_{a_{jl}} + \tau_{jl}^{max}, k_{d_{jr}}\}$$

où  $k_{a_{jl}}$  est l'instant d'arrivée en sortie de piste  $j$  du  $l^{i\text{ème}}$  vol et  $k_{d_{jr}}$  l'instant de départ du prochain vol issu du poste de stationnement alloué au vol arrivant (avec le même avion).

$L_{P_S}$  est l'ensemble des points d'entrée sur les pistes (1 par piste), à chaque instant il n'y a qu'une seule sortie au plus et les  $d_j^m(k)$ ,  $j \in L_{P_S}, m \in \omega^-(j)$ , sont tels que :

$$0 \leq \sum_{m \in \omega^-(j)} d_j^m(k) \leq c_{dj}(k), k = k_0, \dots, k_0 + H$$

où  $c_{dj}(k)$  est la capacité de décollage qui est fortement corrélée avec les temps d'occupation des pistes par les atterrissages.

$L_I$  est l'ensemble des intersections, autre que les points extrêmes du réseau où se créent des files d'attente,



$L_D$  est l'ensemble des points de séparation des routes possibles, il n'y a pas de file d'attente et l'équation dynamique des files d'attente s'y réduit à une équation dynamique de conservation de flux :

$$q_j^1(k) = 0, \forall k = k_0, \dots, k_0 + H, j \in L_D$$

En ce qui concerne les arcs doublement orientés, ceux-ci sont remplacés par deux arcs équivalents de capacité réduite et où il ne peut y avoir de file d'attente.

Les diverses capacités introduites ici :  $Q_j^{max}$ ,  $c_j$  et  $c_{dj}(k)$  sont prises entières.

### **VIII.4.3 Approche opérationnelle de résolution du problème et définition des itinéraires**

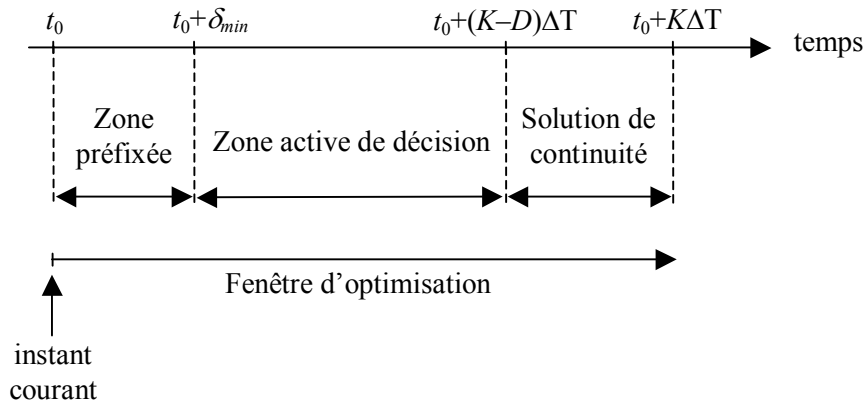
Les variables de décision, les  $x_j^{mi}(k)$ , sont naturellement entières et il est certain que la résolution du problème de programmation linéaire en nombre entiers en résultant, conduirait à des temps de calcul prohibitifs ou alors à la seule résolution effective des problèmes de très petite taille.

Si l'on relaxe l'intégrité de ces variables, on se retrouve avec un problème de minimisation d'un coût linéaire d'un flot dynamique dans un réseau et pour lequel il existe plusieurs méthodes, par exemple [Grigoriadis et Khachiyan, 1994], de résolution efficaces permettant de traiter des problèmes de grande taille. Malheureusement, la solution de ce problème peut être non entière.

En fait, considérant les propriétés topologiques du réseau support des routes et considérant que les quantités écoulées au cours d'une période de temps sont entières, afin de garantir à la solution son intégrité, il faudrait s'assurer que les flux injectés dans le réseau le sont et que les flux issues des points de séparation entre deux routes concurrentes le sont aussi.

En fait, dans le cadre de la mise en œuvre opérationnelle le problème de la gestion des files d'attente ne se posera pas dans les termes présentés au paragraphe précédent. En effet, à un instant courant de décision  $t_0$ , certaines décisions sont déjà prises : elles concernent les avions déjà en mouvement sur la plate-forme (l'instant de départ, la route courante) et les avions qui démarreront leurs opérations avant l'instant  $t_0 + \delta_{min}$ , en ce qui concerne les départs. Par ailleurs, tous les avions dont les activités sont programmés nominalement à partir d'un instant

$t_0+(K-D)\Delta T$ , où  $D$  est la durée maximale attendue pendant cette période d'activité (voir le niveau de planification) pour une opération de départ ou d'arrivée, seront supposés suivre leur programmation nominale d'instants d'entrée dans le système le long d'une route nominale et en cas de conflit, obéir à des règles simples de priorité (arrivées prioritaires par rapport aux départs, FCFS par exemple). La structure temporelle mise en opération est représentée ci-dessous :



**Figure VIII.6 Structure temporelle opérationnelle**

Un point essentiel de la mise en œuvre opérationnelle est que l'on dispose en principe déjà d'une solution, calculée à l'instant  $t_0 - \Delta T$ , pour la période  $\{t_0 - \Delta T, t_0 + (K-1)\Delta T\}$ . A partir de cette solution, il est possible d'en construire une nouvelle, en principe sous optimale, pour la période  $\{t_0 - \Delta T, t_0 + K\Delta T\}$ . Il suffira pour cela de reprendre la solution précédente à partir de l'instant  $t_0$  et de la compléter sur la période  $\{t_0 + (K-D)\Delta T, t_0 + K\Delta T\}$  pour une procédure nominale. Soit  $\tilde{S}_{t_0}$  cette solution.

Remarquons qu'en période creuse, notamment en début de journée, la solution du problème d'optimisation se ramènera pratiquement à l'adoption d'une procédure nominale. Dans le cas où il peut y avoir des conflits, au démarrage de la procédure d'optimisation, donc hors ligne, l'approche présentée au paragraphe VIII.2, basée sur la résolution directe d'un problème d'optimisation linéaire entier, serait envisageable.

Il n'est pas question ici de résoudre dans le cas général et en ligne, de façon optimale, le problème de programmation linéaire entière formulé au paragraphe précédent et appelé ici GFA-E (Gestion des Files d'Attente – Entier), bien que des méthodes basées sur la Programmation Dynamique ou le Branch and Bound, pourraient être envisageables.

L'approche proposée ici consiste à :

1. Relaxer le problème d'optimisation de la gestion des files d'attente, en considérant des variables de décision continues, non plus binaires, mais réelles et comprises entre 0 et 1 et en ajoutant des contraintes de complémentarité à 1 lorsque nécessaire : on parlera du problème GFA-C (Gestion des Files d'Attente – Continu)
2. Résoudre par un algorithme de Programmation Linéaire Continue (Simplex réseau [Orlin, 1996], Simplex dynamique [Faye et al., 1998]) le problème GFA-C en partant de la solution de base  $\tilde{S}_{t_0}$
3. Plusieurs situations se présentent alors :
  - a. Si  $\tilde{S}_{t_0}$  est déjà une solution optimale, l'adopter à  $t_0 + K\Delta T$ .
  - b. Si la solution du problème GFA-C,  $S_{t_0}^*$ , est différente de  $\tilde{S}_{t_0}$  mais entière, l'adopter.
  - c. Si la solution du problème GFA-C,  $S_{t_0}^*$ , est différente de  $\tilde{S}_{t_0}$ , non entière mais voisine à  $\varepsilon$  près, avec  $\varepsilon$  suffisamment petit (0,05 par exemple), d'une solution entière admissible  $\bar{S}_{t_0}$  ( $\forall i, j, k, l \mid x_i^{*jl}(k) - \bar{x}_i^{jl}(k) < \varepsilon$ ), adopter celle-ci. La solution entière sera alors obtenue par une simple opération d'arrondi à la valeur entière la plus voisine.
  - d. Si la solution du problème GFA-C n'est pas  $\varepsilon$ -voisine d'une solution entière admissible, on revient en arrière dans les itérations du simplex dans la recherche de la solution jusqu'à ce que l'on trouve une solution voisine à  $\varepsilon$  près d'une solution entière admissible.

A ce stade là, on peut soit adopter cette dernière solution, soit ne pas s'en contenter (ce sera le cas notamment si on est revenu à la case de départ) et développer une procédure heuristique d'optimisation locale qui peut néanmoins s'appuyer sur les coûts marginaux associées à la solution intermédiaire qui sert de base à l'exploration locale. Une méthode de recherche stochastique locale peut être aussi envisagée ici (Algorithmes Génétiques [Goldberg, 1989], Algorithmes des Fourmis [Taillard et al., 2001]).

Rien n'empêche, afin d'éviter au cours des périodes successives de temps une dérive de plus en plus sous optimale des solutions adoptées, de résoudre périodiquement de façon directe et hors ligne le problème GFA-E, de façon à vérifier la qualité des solutions adoptées. Utilisant dans ce cas un horizon d'optimisation beaucoup plus grand, il pourra être intéressant de

recupérer pour la période  $\{t_0, t_0+K\Delta T\}$  la solution qu'il donne afin d'effectuer si nécessaire un recalage vers l'optimalité.

Une fois obtenue une solution entière au problème de gestion des files d'attente à l'instant  $t_0$ , il sera alors, compte tenu des hypothèses associées au modèle présenté en VIII.4.2.2, possible de retrouver pour chaque avion l'itinéraire qu'il doit adopter dans le réseau de files d'attente.

On a donc la chaîne de traitement suivante à chaque instant de décision  $t_0$  :

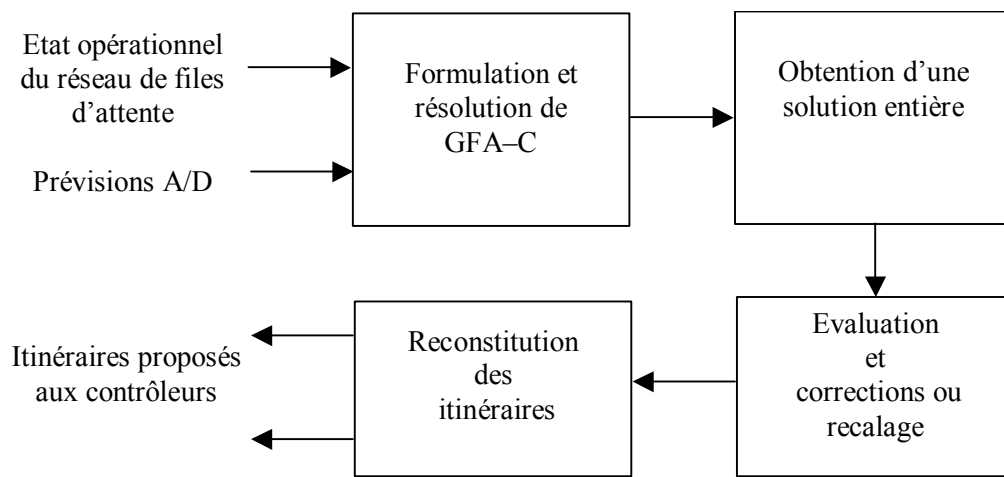


Figure VIII.7 Chaîne de traitement proposée pour la gestion des mouvements au sol

#### VIII.4.4 Résultats numériques

Les résultats présentés graphiquement ci-dessous obtenus par utilisation des données aléatoires illustrent l'approche numérique proposée dans le cas de l'aéroport de Toulouse-Blagnac (voir figure VI.2).

Le trafic réel est représenté dans la figure VIII.8. En tenant compte du profil de la demande actuelle du trafic et des prévisions de croissance de celle-ci, les données de trafic représentées dans la figure VIII.9 ont été utilisées pour valider l'approche proposée. Dans ce scénario la demande de trafic augmente de manière très importante avec l'infrastructure actuelle, cette situation va saturer l'aéroport.

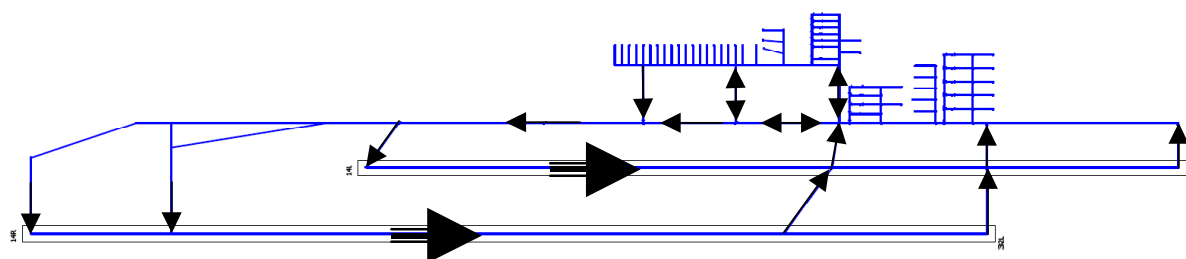
La configuration actuelle de la plate-forme est QFU 14, voir figure VIII.10, avec le plan de circulation résultant de la phase d'évaluation de la capacité avec un niveau de trafic très élevé donné.



Figure VIII.8 La demande de trafic pour l'aéroport de Toulouse-Blagnac, 2003 et 2004



**Figure VIII.9 Données représentant une estimation de la demande de trafic**



**Figure VIII.10 Le plan de circulation retenu**

Dans ce contexte, la performance de l'approche proposée est comparée avec la procédure courante de gestion des mouvements des avions au sol. Le retard moyen subi par les avions circulant sur la plate-forme aéroportuaire est calculé. On peut noter une performance meilleure de l'approche proposée par une diminution significative de retard avec le moteurs en marche avec une attente aux postes de stationnement plus longue (voir figure VIII.11).

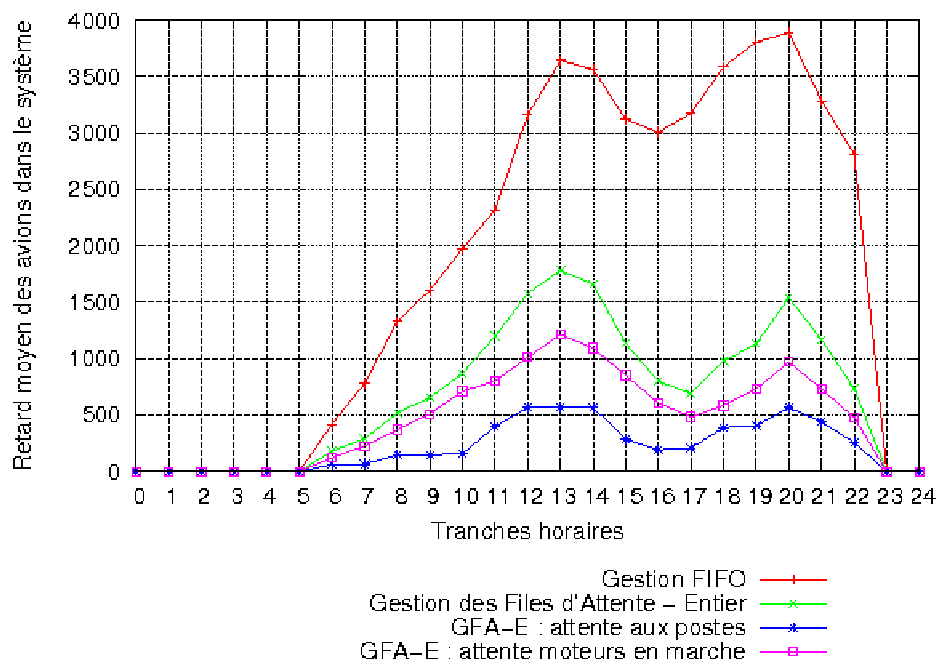


Figure VIII.11 Le retard moyen pour une gestion de type FIFO et GFA-E

## VIII.5 Conclusion

Le processus décisionnel décrit ci-dessus doit pouvoir s'insérer dans le processus global de gestion des opérations aéroportuaires.

Il est clair que le niveau planification et les études de capacité basées sur une représentation en réseau des flux de trafic aéroportuaire développées au chapitre VI, fourniront des éléments de base pour dimensionner différents paramètres nécessaires à la résolution du problème de la programmation nominale des heures de départ et d'arrivée des vols en tenant compte de la capacité disponible des postes de stationnement et des retards moyens estimés sur la plateforme aéroportuaire en fonction de la tranche horaire.

De même, à un niveau pré-opérationnel, il sera possible de corriger ces données en tenant compte des problèmes de saturation de l'espace aérien (arrivées et départs) et des retards liés aux aéroports d'arrivée (saturation de la TMA, des voies de circulation, des zones de stationnement) des vols au départ. Un échange de données avec les logiciels destinés à gérer sur le plan tactique le trafic aérien devra être mis en œuvre.

Un modèle de simulation, opéré en parallèle avec le système réel de trafic sol et resynchronisé périodiquement sur celui-ci par des événements typiques (en général passage d'un avion en un point particulier), permettra d'obtenir en ligne une estimation des files d'attente, ce qui constituera l'une des entrées principales du problème de gestion des files d'attente.

Les solutions en termes d'itinéraires seront alors rendues disponibles aux contrôleurs qui disposeront quand même d'une grande flexibilité pour les adapter aux conditions opérationnelles réelles (départs retardés, modifications d'itinéraire).

Par ailleurs, les contrôleurs pourront mettre en œuvre, au niveau de la gestion des conflits et des files d'attente, différents heuristiques dont les résultats seront pris en compte par le système de gestion de files d'attente. Il est aussi possible d'envisager, à la sortie de celui-ci, de produire des éléments de diagnostic automatique attirant l'attention du contrôleur sur certaines situations critiques (taille excessive d'une file d'attente, retard excessif pour un avion au départ).





## **Conclusion Générale**



L'objectif principal de cette thèse a été de contribuer sur le plan méthodologique à l'amélioration des techniques de gestion des flux d'avions sur les plate-formes aéroportuaires. Cette étude c'est placée aussi bien au niveau de la planification des activités aéroportuaires qu'au niveau de leurs opérations.

Face aux nombreuses études et travaux déjà réalisés dans ce domaine par d'autres équipes de recherche et compte tenu du peu d'éléments détaillés sur ceux-ci qui auraient pu permettre, une fois choisi ce thème, d'approfondir l'une de ces lignes de recherche, ne restait plus que la voie de l'originalité. Celle-ci semblait ardue, compte tenu de la multitude d'études préexistantes et de la difficulté à tenir compte des contraintes associées à l'applicabilité des systèmes d'aide à la décision dans ce domaine. La démarche scientifique retenue ici a été celle de l'analyse de la problématique générale, de son dédoublement suivant ses composantes temporelles de moyen et court terme et d'identifier les principaux problèmes décisionnels à traiter. L'étude de l'état de l'art et sa comparaison avec les conditions d'applicabilité a alors permis dans plusieurs cas de dégager une approche originale.

Ainsi, sur le moyen terme, la notion de capacité d'une plate-forme aéroportuaire a été revue en introduisant sur le plan global une troisième dimension (celle du trafic au sol). Ceci a alors permis de proposer une nouvelle approche d'évaluation de la capacité théorique et de la capacité pratique d'une plate-forme aéroportuaire.

Sur le court terme, la prise en compte éventuelle d'un réseau de files d'attente, caractéristique de situation de saturations, a permis de proposer une approche originale, de caractère adaptatif, pour le choix des itinéraires suivis par les aéronefs sur les voies de circulation d'une plate-forme aéroportuaire.

Ces deux contributions restent encore largement au stade de propositions, beaucoup reste à faire dans le domaine de leur évaluation numérique et dans les détails de leur mise en œuvre de façon coopérative avec d'autres systèmes destinés à l'aide à la décision pour le gestionnaire ou le contrôleur du trafic des avions au sol. Nous avons donc le sentiment d'avoir ouvert de nouvelles voies de réflexion dans ce domaine qui sont largement caractérisées par un souci d'applicabilité et pour lesquelles de riches perspectives, sur le plan scientifique comme sur le plan technique, peuvent être attendues.



## **Annexes**



## A – Un algorithme polynomial pour les problème de flot à coût minimum avec des coûts quadratiques [Minoux, 1984]

Les problèmes des flots en réseau à coût minimum peuvent être modélisé par des fonction quadratiques. Parmi les problèmes classiques associés à cette formulation on peut citer : l'équilibre du trafic en réseaux de communication (de trafic urbain, télécommunication), le routage en réseau, l'affectation du trafic.

Les algorithmes de résolution des problèmes d'optimisation quadratiques sont très complexes et très lourds à mettre en œuvre pour les problèmes de grande taille ou pour la résolution en temps réel. Des techniques de linéarisation, des versions spécialisées de l'algorithme de Frank-Wolfe, les méthodes Newton ou quasi-Newton, sont les algorithmes les plus employés pour la résolution de ces problèmes quadratiques. Des formes particulières de ce problème ont été étudiées pour réduire les temps de calcul. Un de ces cas est le problème des flots à coût minimum avec des coût quadratiques, plus précisément avec des coût quadratiques séparables, de la forme :

$$\sum_{u \in U} \frac{1}{2} w_u (\varphi_u - \bar{\varphi}_u)^2,$$

où  $U$  est l'ensemble des arcs du graphe associé au réseau,  $w_u$  est le coût de passage d'une unité de flux sur l'arc  $u$ ,  $\varphi_u$  est le flux qui traverse l'arc  $u$  et  $\bar{\varphi}_u$  est un flux de référence.

L'algorithme polynomial proposé dans [Minoux, 1984], consiste à faire des approximations successives de la fonction coût par des fonctions linéaires par morceaux jusqu'à ce que l'optimum ou un quasi-optimum est trouvé. La méthode de résolution est basée sur la dualité entre les flots non linéaires séparables dans un réseau et la diagramme des arcs non conformes (kilter diagram). Le problème (P) de flots dans le graphe associé à un réseau peut être formulé comme suit :

$$(P) \quad \min \sum_{u \in U} \gamma_u(\varphi_u)$$

sous les contraintes :

$$\mathbf{A}\underline{\varphi} = \underline{0} \tag{A.1}$$

$$b_u \leq \varphi_u \leq c_u, \quad u \in U \tag{A.2}$$

où  $\gamma_u(\varphi_u) = \frac{1}{2} w_u (\varphi_u - \bar{\varphi}_u)^2$ ,  $w_u > 0$ ,  $A$  est la matrice d'incidence des nœuds aux arcs,  $b_u$  et  $c_u$  sont les capacités inférieure et supérieure de l'arc  $u$ .

La formulation équivalente du problème (P) en termes de la diagramme des arcs non conformes est donnée par :

$$(\text{DAN}) \quad \mathbf{A}\underline{\varphi} = \underline{0}$$

$$b_u \leq \varphi_u \leq c_u, u \in U$$

$$\nabla \gamma(\underline{\varphi}) - \pi \mathbf{A} + \lambda \mathbf{T} - \mu \mathbf{I} = 0$$

$$\lambda_u (c_u - \varphi_u) = 0$$

$$\mu_u (\varphi_u - b_u) = 0$$

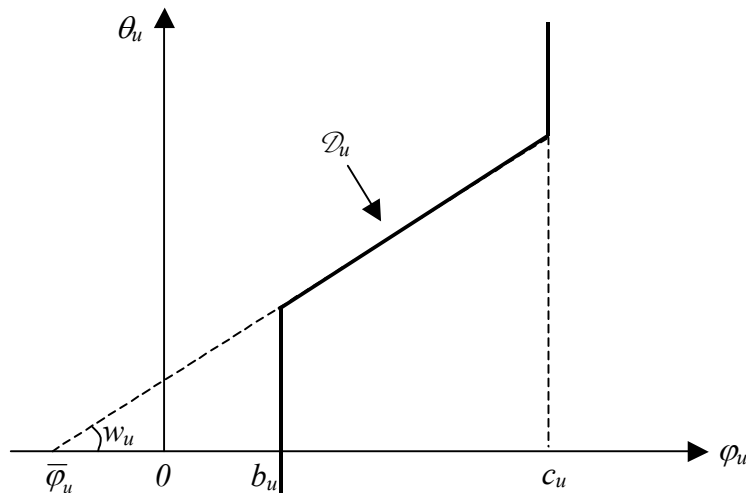
$$\lambda \geq 0, \mu \geq 0, \pi \in \mathbb{R}$$

où

$\pi$  sont les variables duales associées aux contraintes (A.1),  $\lambda$  et  $\mu$  sont les variables duales associées aux contraintes (A.2),  $\nabla \gamma_u(\varphi_u) = \frac{d\gamma_u(\varphi_u)}{d\varphi_u}$  est le gradient de la fonction coût. Les

variables  $\pi$  sont les potentiels associés aux nœuds. On peut définir la tension  $\theta_u$  d'un arc  $u = (i, j)$  comme étant la différence de potentiel entre les deux nœuds  $i$  et  $j$  :  $\theta_u = \pi_j - \pi_i$ , d'où la relation  $\theta = \pi \mathbf{A}$ . Pour chaque arc  $u$  on peut construire la diagramme de conformité  $\mathcal{D}_u$  (voir figure A.1) comme la tension de l'arc  $\theta_u$  en fonction du flux  $\varphi_u$ , elle représente une fonction croissante et monotone. Le problème (P) peut être alors reformulé comme :

Trouver un flot  $\varphi$  et un ensemble des potentiels  $\pi$  tel que pour les tensions associées  $\theta = \pi \mathbf{A}$  on a  $(\varphi_u, \theta_u) \in \mathcal{D}_u, \forall u \in U$ .



**Figure A.1** La diagramme de conformité pour une fonction de coût quadratique séparable



---

Définition : le degré de conformité d'un arc  $u$  est  $\sigma_u(\varphi_u, \theta_u) = \min_{\tilde{\varphi}} \{ \|\varphi_u - \tilde{\varphi}_u\| \mid (\tilde{\varphi}_u, \theta_u) \in \mathcal{D}_u \}$  qui représente la différence entre le flux actuel et le flux conforme pour la même tension. Pour un arc conforme le degré de conformité est zéro.

L'algorithme des arcs non conformes est un procédé itératif qui à partir d'un point initial  $(\varphi^0, \theta^0)$  doit minimiser la fonction :  $\sigma(\varphi, \theta) = \sum_{u \in U} \sigma_u(\varphi_u, \theta_u)$ . Chaque itération consiste à changer les flots d'un cycle du graphe qui contient un arc non conforme, sans changer ceux des arcs conformes.

L'algorithme suppose que les capacités des arcs sont des entiers et que la fonction objectif peut être approximée par une fonction linéaire par morceaux. Pour le codage binaire du problème (P) on prend  $T = (M + N) \lceil \log_2 N \rceil + 2M(2 + \lceil \log_2 c_{\max} \rceil + \lceil \log_2 W \rceil)$ ,

où  $M$  est le nombre d'arcs, et  $N$  le nombre de nœuds, avec  $c_{\max} = \max_{u \in U} \{ \max\{c_u\}, \max\{b_u\} \}$ , et  $W = \max_{u \in U} \{ \max\{w_u\}, \max\{|\bar{\varphi}_u|\} \}$ .

Définition de l'approximation d'ordre  $p$  ( $p$  entier) du problème (P) par des fonctions linéaires par morceaux, notée  $PA[p]$  :

Pour chaque arc  $u \in U$  on défini :

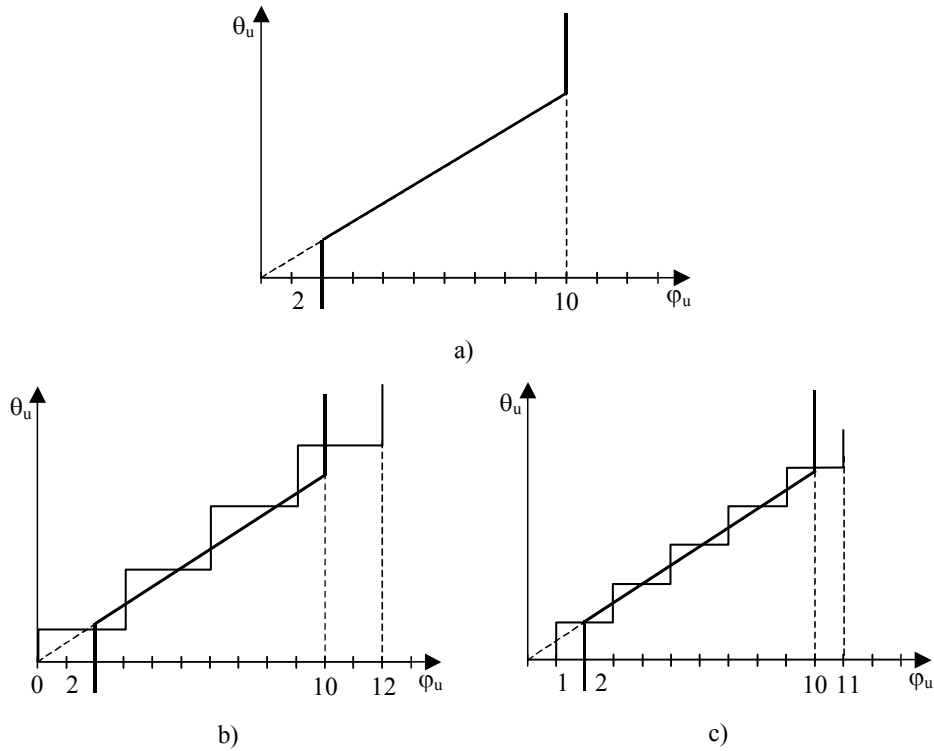
- les capacités supérieure  $b_u^{(p)} = 2^p \left\lfloor \frac{b_u}{2^p} \right\rfloor$  et inférieure  $c_u^{(p)} = 2^p \left\lceil \frac{c_u}{2^p} \right\rceil$ ,
- les discontinuités du diagramme de conformité qui correspondent aux abscisses  $k2^p$  pour  $k$  entier on a :  $\left\lfloor \frac{b_u}{2^p} \right\rfloor \leq k \leq \left\lceil \frac{c_u}{2^p} \right\rceil$ ,
- la diagramme de conformité de (P) et  $(PA[p])$  coïncident au milieu de chaque intervalle  $[k2^p, (k+1)2^p]$  pour  $\left\lfloor \frac{b_u}{2^p} \right\rfloor \leq k \leq \left\lceil \frac{c_u}{2^p} \right\rceil - 1$ .

L'intérêt du problème  $(PA[p])$  est qu'il a une série de propriétés spéciales par rapport au problème (P) :

- i) si (P) a une solution alors pour tout entier  $p$  l'approximation d'ordre  $p$   $(PA[p])$  a aussi une solution ;
- ii) si  $\gamma_u^{(p)}(\varphi_u)$  est la fonction objectif de l'arc  $u$  pour le problème  $(PA[p])$  et  $\gamma_u(\varphi_u)$  la fonction objectif pour le problème (P) alors pour tout entier  $k$ ,  $\gamma_u^{(p)}(k2^p) = \gamma_u(k2^p)$  alors pour tout  $\varphi_u$ ,

$$\gamma_u(\varphi_u) + w_u 2^{p-3} \geq \gamma_u^{(p)}(\varphi_u) \geq \gamma_u(\varphi_u) \geq \gamma_u^{(p)}(\varphi_u) - w_u 2^{p-3}.$$

- iii) Pour tout  $p \leq 0$  (PA[p]) a les mêmes capacités que (P), et en particulier une solution optimale de (PA[p]) est une solution optimale pour (P).
- iv) Quand l'algorithme des arcs non conformes est appliqué pour résoudre le problème (PA[p]), si toutes les flots initiaux sont entiers multiples de  $2^p$  alors ils restent entiers et multiples de  $2^p$  pendant les itérations.
- v) Quand une solution optimale de (PA[p]) est considérée comme point initial de (PA[p-1]), la valeur initiale du degré de conformité est au maximum  $M2^{p-1}$ .
- vi) Le nombre d'opérations nécessaires pour obtenir la solution optimale de (PA[p-1]) à partir de la solution de (PA[p]) est d'ordre  $\mathcal{O}(MN^2)$ .
- vii) Soit  $\bar{p} = \lceil \log_2 c_{\max} \rceil$  avec  $2^{\bar{p}-1} \leq c_{\max} \leq 2^{\bar{p}}$ , le flot nul  $\varphi = 0$  est une solution admissible pour le problème (PA[ $\bar{p}$ ]) et le nombre des opérations pour obtenir une solution avec  $\pi = 0$  est d'ordre  $\mathcal{O}(MN^2)$ .



**Figure A.2 La diagramme de conformité pour un problème de flux à coût quadratique minimum et les approximations par une fonction marche**

**a) la diagramme de conformité avec  $b_u = 2, c_u = 10, w_u = 2, \bar{\varphi}_u = 0$**

---

**b) l'approximation d'ordre**  $p = 2, b^{(2)} = 0, c^{(2)} = 12$

**c) l'approximation d'ordre**  $p = 1, b^{(1)} = 1, c^{(1)} = 11$

L'algorithme proposé consiste à résoudre le problème (PA[p]) pour  $p = \bar{p}, \bar{p} - 1, \dots, q$  et pour chaque pas  $p$ , le flot optimum  $\varphi^{p*}$  est utilisé comme point de départ pour résoudre le problème (PA[p-1]).

L'algorithme (A) :

Pas 1.

soit  $\bar{p} = \lceil \log_2 c_{max} \rceil$ ,  $p = \bar{p}, \varphi = 0, \theta = 0$

Pas 2.

Résoudre le problème (PA[p]) avec le flot  $\varphi$  et la tension  $\theta$  comme solution et soit  $\bar{\varphi}$  le flot optimum et  $\bar{\theta}$  la tension optimum

Pas 3.

SI  $p=q$  ALORS STOP

SINON  $\varphi \leftarrow \bar{\varphi}, \theta \leftarrow \bar{\theta}, p \leftarrow p-1$  reprendre au Pas 2.

On a aussi le résultat suivant établi par Minoux [Minoux, 1982] :

Pour obtenir une solution admissible  $\varphi$  du problème (P) tel que  $\|\varphi - \varphi^*\| < \varepsilon$ , où  $\varphi^*$  est la solution optimale, il suffit de choisir  $q = 2 - \lceil \log_2 MW \rceil - \left\lceil \log_2 \frac{1}{\varepsilon^2} \right\rceil$ . La complexité totale de

l'algorithme précédant est alors d'ordre

$\mathcal{O}((\bar{p} - q)MN^2)$  ou

$\mathcal{O}(\lceil \log_2 c_{max} \rceil + \lceil \log_2 MW \rceil + \log_2 \left\lceil \frac{1}{\varepsilon^2} \right\rceil) \cdot \mathcal{O}(MN^2)$ ,

et finalement

l'algorithme (A) résout le problème (P) avec des coûts séparables dans en temps polynomial d'ordre

$\mathcal{O}(MN^2) \cdot \mathcal{O}(\lceil \log_2 c_{max} \rceil + \lceil \log_2 MW \rceil + 4M \lceil \log_2 N \rceil + 4(3M + N - 1) \lceil \log_2 (3M + N - 1) \rceil)$ ,

sans le calcul nécessaire pour arrondir les coefficients.

## **B – Airport Ground Mouvement Simulator (AGMS) : un outil pour la simulation des mouvements des avions au sol**

### **Introduction**

Cette annexe présente un outil permettant de simuler et d'évaluer la circulation des aéronefs au sol. Son principe consiste à chercher pour chaque avion présent sur la plate-forme, le plus court chemin vers sa destination. Pour cela, la théorie des graphes est utilisée. L'algorithme de Dijkstra permet de calculer la distance minimale entre chaque point du graphe (intersection de voies de circulation) et tous les points destinations (poste de stationnement ou point d'arrêt de piste). Une distance peut être transformée en temps (on suppose dans ce calcul que les avions ont une vitesse constante). On obtient ainsi le coût (ou temps) minimal théorique pour aller de n'importe quel point du graphe vers n'importe quelle destination.

### **Généralités sur le programme**

Le programme a été développé en langage C++. Le code se présente sous la forme de plusieurs fichiers correspondant chacun à un des modules de programme.

L'algorithme utilisé pour trouver le chemin de moindre coût est de type Dijkstra avec quelques modifications (pour plus de détail voir la fonction `BuildPath(node_source, node_destination)` dans la `class graph` (fichier `graph.cpp` et `graph.h`)). On initialise d'abord un ensemble `P_Open` avec les arcs sortants de `node_source`, puis on va chercher un chemin jusqu'au `node_destination` en utilisant une recherche en largeur d'abord (`P_Open.push_front(tmpWP)`). Le parcours en largeur consiste à parcourir les nœuds du graphe en commençant toujours par les plus proches du point de départ. Pour cela, on utilise une file, dans laquelle on met des arêtes à visiter. Ces arêtes sont des couples de nœuds,  $(d, a)$  tels que  $d$  et  $a$  soient voisins,  $d$  a déjà été entièrement traité et pas  $a$ . Au départ, cette file ne contient que le nœud de départ  $(d, d)$ .

---

L'algorithme est alors le suivant : on enlève la première arête ( $d, a$ ) de la file. Si  $a$  est le point d'arrivée, on a fini. Sinon, on ajoute en queue de file toutes les arêtes ( $a, b$ ) telles que  $b$  soit un voisin de  $a$  non visité et on note que tous les  $b$  seront visités. Pour trouver donc le chemin optimal, le programme assure les actions suivantes dans l'ordre ci-dessous :

1. traite tous les évènements possibles ;
2. obtient le premier élément de la liste des évènements ;
3. vérifie s'il y a déjà un chemin trouvé (destination) ;
4. construit l'automate associé ;
5. efface le premier élément qui vient d'être pris en considération ;
6. marque le fait que l'avion suit ou non un arc donné ;
7. vérifie s'il y a d'autres éléments à traiter ;
8. pour chaque d'évènement, il vérifie s'il y a assez d'espace disponible (dans la table d'attribution des ressources) pour l'effectuer.

Le programme est composé des modules ci-dessous :

- Graph.cpp : ce fichier contient le code de l'algorithme aboutissant au dessin des nœuds, des arcs, des pistes.
- Graph.h : ce fichier contient les déclarations de type et les déclarations de fonctions avec leur typage.
- Data.txt : ce fichier contient les données sur la topologie de l'aéroport (nœuds, arcs, parkings, pistes), le trafic, les performances des aéronefs fréquentant l'aéroport, les contraintes de l'ATC (les temps de séparation entre aéronefs), et les programmations des vols sur l'aéroport.

Au lancement du programme, nous avons le fichier GRAPH.txt permettant de visualiser le graphe de l'aéroport. Pour démarrer, le simulateur a besoin des données dont les en-têtes sont indiqués par ''#...#'' et qui seront saisies suivant le modèle ci-après dans un fichier avec une extension « .txt » :

#AIRPORT#

le nom de l'aéroport

#END-AIRPORT#

#AIRCRAFT-DATABASE#

type d'avion  
longueur de l'avion  
le temps de repoussage  
temps de rotation  
vitesse maximale de roulage  
vitesse minimale de roulage

#END-AIRCRAFT-DATABASE#

#AIRCRAFT-SEPARATION-TIME#

1<sup>er</sup> avion  
avion suivant  
le temps de séparation entre les deux avions  
type d'opération du 1<sup>er</sup> avion (décollage=0, atterrissage=1)  
type d'opération de l'avion suivant

#END-AIRCRAFT-SEPARATION-TIME#

#NODES#

abscisse  
ordonnée  
identificateur du nœud  
position de l'avion après tractage

#END-NODES#

#EDGES#

1<sup>er</sup> nœud  
2<sup>ème</sup> nœud  
orientation de l'arc (sans orientation = 0, du 1<sup>er</sup> nœud vers 2<sup>ème</sup> nœud = 1, du 2<sup>ème</sup> nœud vers le 1<sup>er</sup> nœud = 2, arc fermé à la circulation = 3, arc appartenant à la piste =4)  
identificateur de l'arc

#END-EDGES#

#PARKINGS#

arc d'accès à la zone de stationnement  
arc(s) de sortie de la zone de stationnement  
les numéros des postes de stationnement situées dans cette zone

---

#END-PARKINGS#

#RUNWAYS#

orientation de la piste

QFU1, QFU2

les arcs de la piste dans l'ordre de l'orientation

les sorties de piste

les entrées de piste

type d'avion et les opérations possibles pour chaque élément de la piste

#END-RUNWAYS#

#SCHEDULES#

identificateur de l'avion

la catégorie de l'avion

QFU en service

numéro de poste occupé ou à occuper

temps de début de l'opération

type d'opération

#END-SCHEDULES#

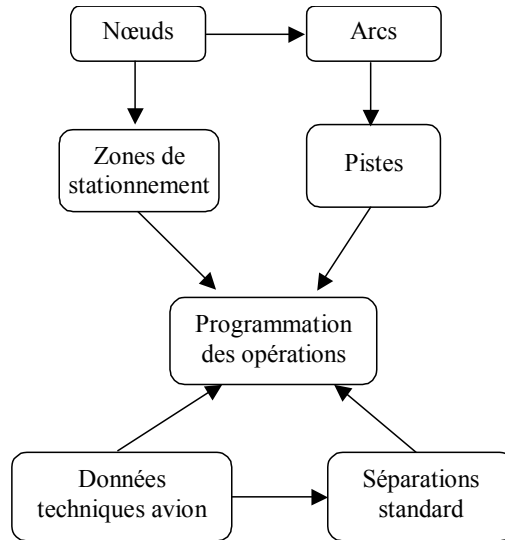
Les aéronefs ont été classés en quatre catégories selon leur poids :

Catégorie	MTOW (tonnes)	Longueur (mètres)
Lourd (H)	>136	70
Moyen (M1)	136>MTOW>40	38
Moyen (M2)	40>MTOW>7	23
Léger (L)	<7	15

Le temps de rotation est le temps après lequel les avions à l'atterrissage doivent décoller (temps de séjour sur l'aéroport). Il a été défini pour permettre d'utiliser les ressources (postes de stationnement) de façon à accueillir le plus de trafic possible. Aussitôt que les aéronefs à l'arrivée se rendent aux postes de stationnement qui leur ont été attribués, ils sont transformés automatiquement en aéronefs de départ et repartent après le temps de rotation. Ces départs sont gérés de manière automatique par le simulateur.

Le poste de stationnement à occuper est attribué par l'opérateur. On pouvait aussi envisager une autre stratégie dans laquelle, les postes de stationnement d'aéronefs seraient attribués automatiquement selon les contraintes telles que la disponibilité et la résistance des postes de stationnement.

La liaison entre les différentes données est présentée dans la figure ci-dessous :



Après une simulation, un certain nombre de fichiers contenant des statistiques sur les résultats de la simulation sont générés par le simulateur.

**PATH.txt** contient toutes les trajectoires possibles que peuvent emprunter les avions d'un point d'origine à un point de destination, les poids qui leur sont associés et les trajectoires qui ont été choisies pour les avions.

Le poids d'un chemin est fonction de la longueur du chemin et de la densité de trafic sur ce dernier. Il est la somme des poids des arcs qui le composent. Le poids d'un arc est défini comme suit :

$$\text{weight}(\text{acr}_i) = \frac{l_i}{l^{\max}} + \sum_{k=1}^n \frac{2l_{a_k}}{l_i}$$

avec  $l_i$  longueur de l'arc  $i$ ,  $l^{\max}$  la longueur du plus grand arc de l'aéroport,  $n$  le nombre d'avions présents sur l'arc  $i$  à un instant donné et  $l_{a_k}$  est la longueur de  $k^{\text{ième}}$  avion sur l'arc  $i$ .

Lorsque deux ou plusieurs trajectoires ont le même poids minimal, le programme procédera à un choix aléatoire parmi ces trajectoires.



---

**EVENTS.txt** : fichier contenant la liste de tous les évènements pour chaque avion dans l'ordre croissant du temps de début d'évènement. Il présente pour chaque type d'évènement (automate) le temps de début (ST – start time), le temps de fin (ET – end time) et le temps total (TT – total time,  $TT = ET - ST$ ) mis pour effectuer cet évènement.

Notons que si le temps de fin (ET) d'un évènement est égal au temps de début (ST) de l'évènement suivant, cela signifie qu'il n'y a pas eu d'attente.

**CRTEVENT.txt** est le fichier contenant les évènements courants et les évènements suivants, incluant les temps de début, temps de fin et le temps total pour un évènement à chaque phase de l'évolution des aéronefs.

**AUTOMATA.txt** est le fichier contenant la liste des évènements élémentaires (automate) du poste de stationnement à l'entrée de piste pour un aéronef au départ et inversement pour un aéronef à l'arrivée.

**RAT** – ressource allocation table, contient la liste des ressources et leur état (occupé ou non). Dans le cas où la ressource est occupée, son temps d'occupation est précisé. Dans son cheminement, lorsque le nœud vers lequel l'avion doit se diriger est détecté, le programme contrôle s'il y a de l'espace disponible dans le RAT pour y arriver. Au cas où la ressource n'est pas disponible, un ordre d'attente en ce point sera donné à l'avion considéré. Cette attente prendra fin lorsque l'aéronef se trouvant sur le prochain point aurait signalé avoir commencé son roulage.

**Runway Occupancy** contient la liste des intervalles de temps pendant lesquels la piste a été occupée par un aéronef et l'opération que cet aéronef a effectué (atterrissage = 1 et décollage = 0).

**ACDELAY.txt** est le fichier contenant la liste des aéronefs qui circulent sur l'aéroport, leur temps d'entrée dans le système, le temps total d'opération, le temps d'arrivée à l'état final, le `ground_delay` (somme des temps perdus pendant le roulage avant la libération des ressources occupées) et le `start_delay` (temps perdu avant l'entrée dans le système). Le retard total subi par un avion est la somme de ces deux retards.

**RESDELAY.txt** contient la liste des ressources où l'aéronef a subi des retards et la somme de ces retards. Notons que l'analyse de ce fichier permet d'identifier les zones de congestion sur l'aéroport.

## Application à l'aéroport de Dakar

L'aéroport Léopold Sédar Senghor est situé à 8NM (15 KM) de la ville de Dakar. Il est équipé de deux pistes lui permettant de recevoir tous les types d'aéronefs et dont les caractéristiques sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Piste	Dimension (mxm)	Résistance (PCN)	Prolongement d'arrêt	Prolongement dégagé
18/36	3490 x 45	82/F/C/X/U Béton bitume	60m (seuils 18 et 36)	300m (seuil 18)
03/21	1500 x 30	18/F/C/X/W/T Tarmac	30m (seuil 21)	-

Une nouvelle tour de contrôle a été mise en service fin 2002 et est dotée d'équipements modernes. Il est très important de noter que de cette nouvelle tour, les postes de stationnement de jour ne sont pas visibles. Pour y palier, il a été installé sur la tour de contrôle, une caméra de surveillance de ces postes. La circulation des avions au sol ne devrait pas poser de problème majeur pour son fonctionnement habituel, du moins à court terme.

Un projet d'implantation d'un radar secondaire mode S est en cours pour cet aéroport. Celui-ci permettra de résoudre certains problèmes dans la gestion du trafic en vol (longue attente des avions en l'air) avec l'application des minima d'espacement radar (augmentation de la capacité de l'espace aérien). Aussi, le projet d'implantation d'un hub sur le site de Dakar date de nombreuses années. Nous comprenons donc bien, qu'après la résolution des problèmes en l'air, la circulation au sol des avions qui ne pose pas aujourd'hui de problème majeur, du moins à court terme, deviendra un facteur limitatif de la capacité pour cet aéroport.

---

## Analyse des résultats obtenus

Dans ce paragraphe, les résultats des simulations seront détaillés. Nous analyserons également les différences entre les deux types de solutions envisageables : l'approche générale et l'approche minutée.

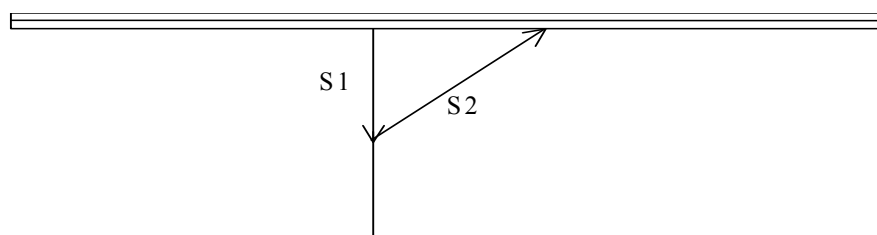
Les résultats expérimentaux sont obtenus pour une journée de trafic sur l'aéroport Léopold Sédar Senghor de Dakar. La base de données utilisée contient  $n$  aéronefs. Pour chaque aéronef, on précise l'heure de décollage ou d'atterrissage, son type, la position exacte de stationnement sur les parkings, le numéro de la bretelle permettant d'entrer sur la piste ou de la dégager.

Pour le choix des pistes, plusieurs critères interviennent, notamment la masse des aéronefs et la saturation des pistes.

Une interface graphique est disponible pour visualiser les mouvements des avions lors des simulations et permet de faire une analyse plus minutieuse. La vitesse de simulation peut être réglée.

## Différentes simulations effectuées

Dans le souci de respecter les réalités opérationnelles (ce qui se fait à l'aéroport de Dakar), les arcs S1 et S2 ont été orientés. Les avions à l'atterrissage dégagent la piste par la bretelle S2 et les avions au décollage procèdent par la bretelle S1.



### Simulation 1 : Approche générale

Dans une première stratégie, appelée approche générale, des simulations ont été réalisées sans tenir compte de la cadence des arrivées sur l'aéroport.

### Simulation 2 : Approche minutée

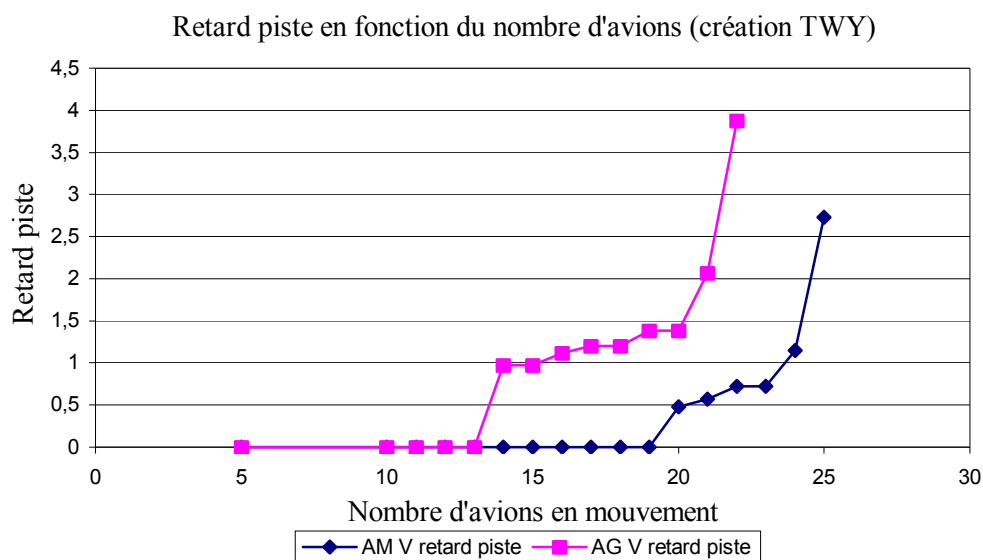
Dans une seconde stratégie, appelée approche minutée, les opérations sont programmées en tenant compte de la cadence (qui est de huit minutes pour le cas de Dakar).

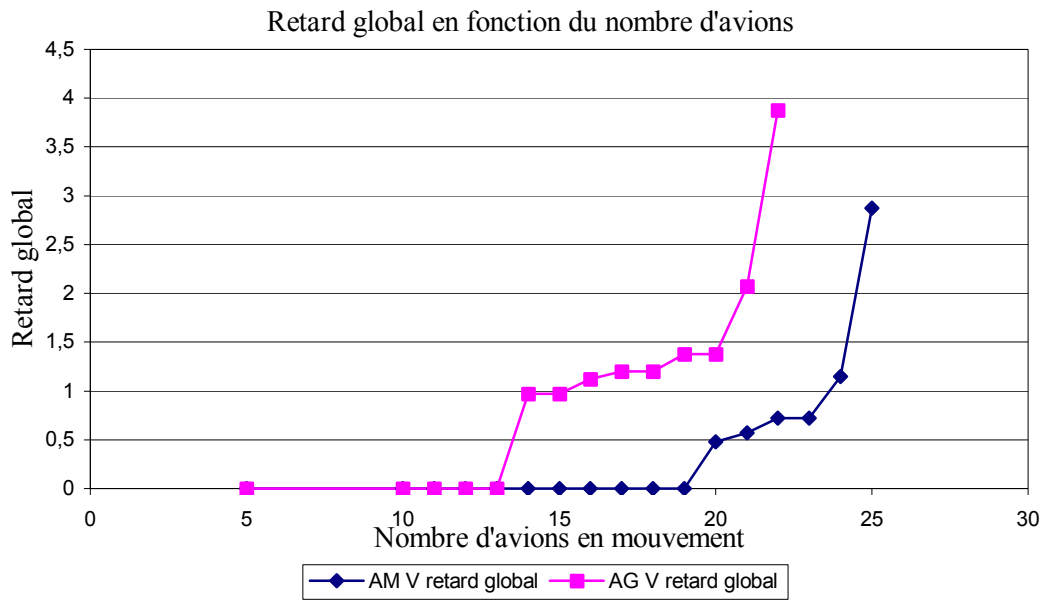
Les simulations ont démontré l'importance d'une bonne gestion des zones de stationnement. En effet, une bonne répartition des postes de stationnement permet d'éviter certains conflits, mais aussi de réduire les retards subis par certains aéronefs. Elles ont également démontré que, la meilleure manière d'exploiter une piste est d'intercaler un décollage entre deux atterrissages chaque fois que cela est possible, même lorsque la proportion d'atterrissages est plus forte que celle des décollages.

### Simulation 3 : Création d'une voie de circulation

Une analyse détaillée des retards a permis de montrer les points critiques de l'aéroport. La création d'une nouvelle voie de circulation (présenté dans les simulations) génère un allongement de trajectoire pour les aéronefs au départ (ces avions n'utilisant pas S1). Contrairement à ce que l'on peut s'attendre, celle-ci ne permet pas d'augmenter grandement la capacité mais permet plutôt d'absorber les retards pris par les aéronefs de manière considérable. Plusieurs explications sont possibles.

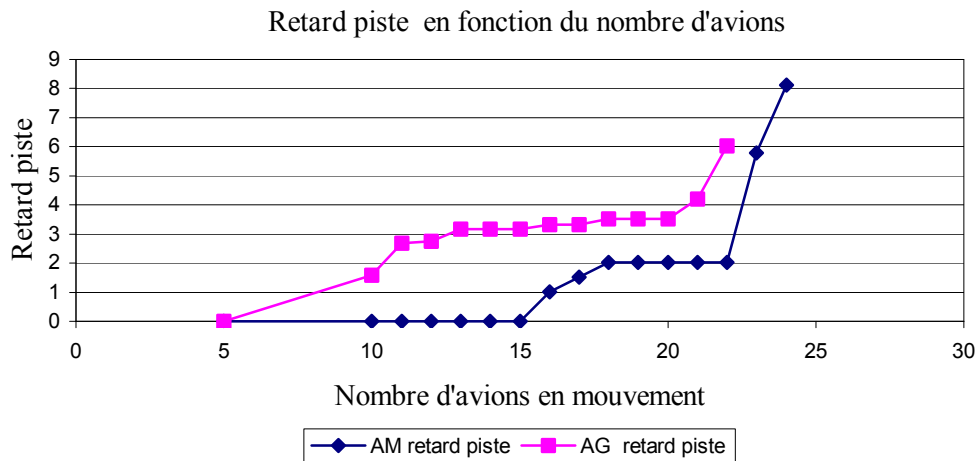
Les avions passent plus de temps sur les voies de circulation qui ne sont utilisées que par les avions au décollage. Ceci génère moins de flux orientés et occasionne moins de conflits. Le temps d'occupation de la piste par les aéronefs au départ utilisant la nouvelle voie de circulation a diminué sensiblement, ceux-ci ne remontent plus la piste, mais y pénètre directement. Ceci a permis d'intégrer deux départs entre deux arrivées, ce qui était très difficile dans la configuration actuelle.

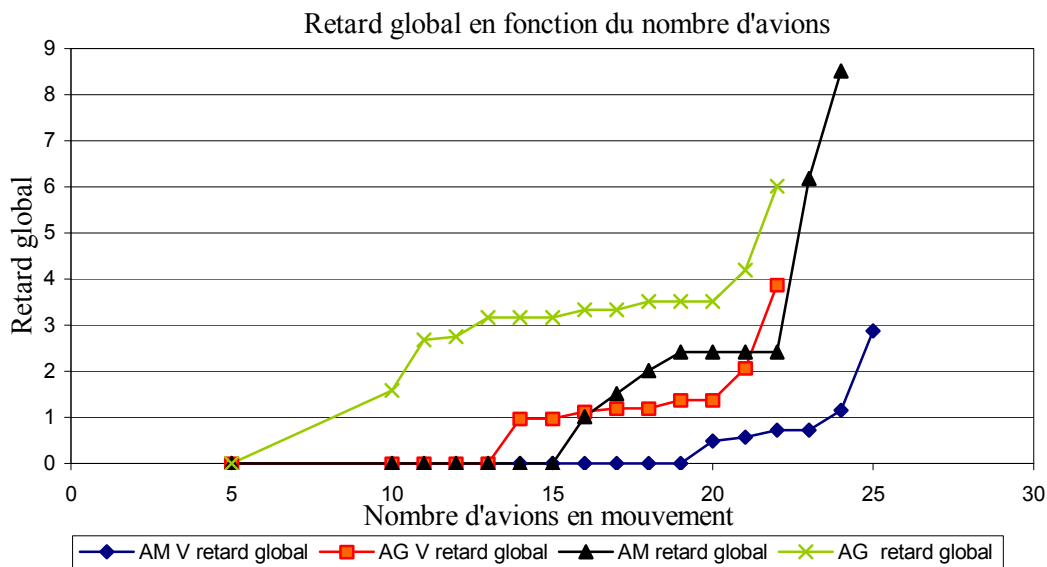
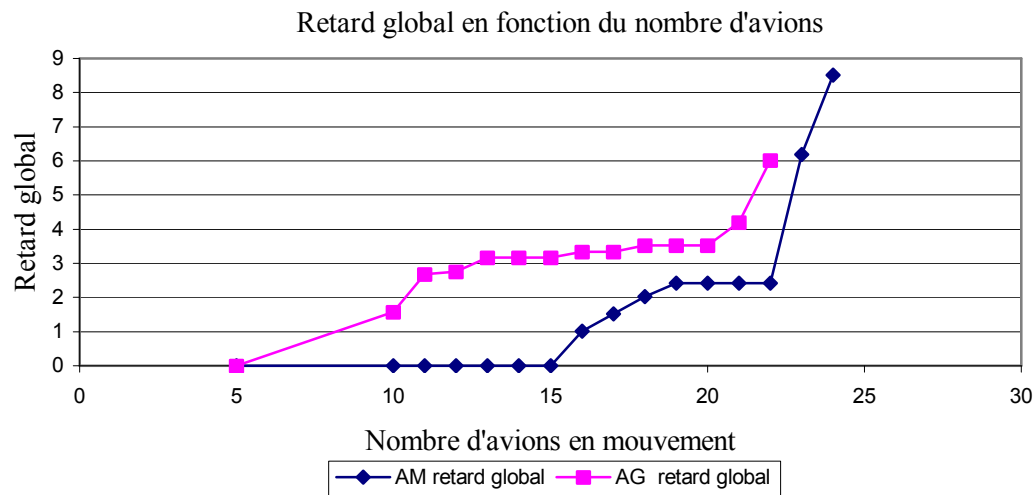




#### Comparaison des deux méthodes

On observe que l'approche générale est toujours moins bonne que l'approche minutée. La différence de retard atteint 3 minutes en moyenne lorsque la plate-forme est chargée (20 avions programmés). L'approche minutée pénalise globalement moins les avions que l'approche générale.





### Analyse des différents paramètres de simulation

Le retard à considérer est la somme de deux retards : le retard d'attente, qui est la somme des retards d'attente au postes et sur les voies de circulation, et le retard de piste dû à l'occupation de la piste.

Le retard est fonction du nombre d'avions évoluant simultanément sur la plate-forme (densité de trafic). Il est également fonction de l'intervalle de temps séparant deux mouvements et les types de mouvement (plus cet intervalle de temps est réduit, plus le retard est grand). Le retard peut être aussi fonction de la répartition des avions sur les parkings. Enfin, il est

---

fonction du mélange de flotte (pourcentage des avions de type H, M ou L) et de la configuration de piste.

L'organisation de l'aéroport peut influencer le retard ; lorsque les avions ont tendance à partir aux mêmes périodes (ce qui reflète la réalité d'un hub), le retard piste est beaucoup plus important.

#### Répartition départ arrivée des retards

Les avions au décollage et à l'atterrissage ne subissent pas les mêmes traitements. En effet, les avions à l'atterrissage sont privilégiés par rapport à ceux au décollage (ce qui reflète tout à fait l'opérationnel). Les simulations présentées permettent de fournir des nombreuses informations pour les décideurs mais elles ont montré aussi les limitations de ce programme.

Le graphe représentant la structure de l'aéroport n'est pas orienté. Tous les taxiways peuvent être utilisés dans les deux sens. Ainsi, deux avions peuvent se trouver dans un type de conflit face à face (il n'y a aucun moyen de faire reculer un avion et un taxiway n'est pas assez large pour envisager un croisement de deux avions). Dans la pratique, les contrôleurs n'utilisent la plupart des taxiways que dans un seul sens à la fois.

Le simulateur conçu ne permet donc que de détecter les conflits (départ-arrivée), mais la résolution de ceux-ci est de la responsabilité de l'opérateur. Cependant, le simulateur assure un séquençement fluide et ordonné entre les mouvements de même nature (atterrissage-atterrissage ou décollage-décollage). Mais, il est à noter que ceci peut être contourné en définissant, si l'infrastructure de l'aéroport s'y prête, des parcours différents pour ces deux types de mouvements (cheminements à l'arrivée et cheminements au départ distincts).

Un module de résolution des conflits (départ-arrivée) permettra d'améliorer ce simulateur. D'autres modules utilisant des algorithmes autres que Dijkstra (utilisé ici) pourront y être ajouté. Les simulations ayant montré la nécessité d'une bonne gestion de parking, un module de gestion automatique de parking pourra être envisagé.

Ainsi qui concerne le temps de calcul, ce simulateur permet de résoudre des situations critiques telles qu'elles peuvent survenir lors de forte densité de trafic au sol, dans un temps raisonnablement court (de l'ordre de quelques secondes).

Il constitue un outil d'aide à la décision pour les exploitants d'aéroport. Il pourrait servir dans l'attribution des créneaux horaires. On pourrait également faire apparaître une limite de saturation en densifiant le trafic (Ceci pourra faire l'objet d'études futures).

## Conclusion

L'étude présentée dans cette annexe permet de simuler la circulation des avions au sol. L'algorithme permet de gérer plus d'une cinquantaine d'avions simultanément. Plusieurs simulations intégrant plusieurs hypothèses ont été réalisées. Ces simulations ont permis de comparer les approches : générale et minutée.

Une analyse détaillée des retards pourrait permettre de montrer les points critiques (points d'engorgement) d'un aéroport.

Les résultats sont présentés en fonction du nombre d'avions en mouvement sur la plate-forme, ce-ci afin de montrer la dépendance des retards en fonction de la densité de trafic.

A partir de l'étude théorique réalisée, un modèle statistique permettant de prévoir le retard d'un avion en fonction de son heure de départ (information très utile pour le contrôle du trafic aérien) a été obtenu.

Le simulateur présenté permet également de simuler le gain apporté par la création d'une nouvelle voie de circulation, ou les retards provoqués par la fermeture d'une voie en travaux par exemple.

Dans cette annexe, il a été présenté un outil de simulation de trafic avion au sol (AGMS) développé au sein du Département Transport Aérien de l'ENAC. Plusieurs simulations intégrant plusieurs hypothèses ont été réalisés sur l'aéroport de Dakar. Une analyse détaillée des retards a permis de montrer les points critiques (points d'engorgement) de cet aéroport. Les résultats sont présentés en fonction du nombre d'avions en mouvement sur la plate-forme, ce, afin de montrer la dépendance des retards en fonction de la densité de trafic. Le simulateur présenté permet également de simuler le gain apporté par la création d'une nouvelle voie de circulation, ou les retards provoqués par la fermeture d'une voie en travaux éventuels.



## Bibliographie

- [Aaron, 1990] Aaron T. Curtis, « Relieving airport congestion : policy changes necessary for the effective control of demand for airport resources », MS Thesis, M.I.T., Février 1990
- [Abela et al., 1993] J. Abela, D Abramson, M. Krishnamoorthy, A De Silva, G. Mills, « Computing Optimal Schedules for Landing Aircraft », The 12<sup>th</sup> National Conference of the Australian Society for Operations Research, Adelaide, July7-9, 1993
- [American Airlines, 1993] American Airlines, « Gate Manager », Sabre Inc., USA, 1993
- [Anagnostakis et al. 2000] Ioannis Anagnostakis, Husni R. Idris, John-Paul Clarke, Eric Feron, R. John Hansman, Amedeo R. Odoni, William D. Hall « A Conceptual Design of A Departure Planner Decision Aid », 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Napoli, 13-16 June 2000
- [Andersson et al., 2000] Kari Andersson, Francisc Carr, Eric Feron and William D. Hall, « Analysis and modeling of ground operations at hub airports », 3<sup>rd</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Napoli, 13-16 June 2000
- [Andreatta et al., 1998] Andreatta, G., Brunetta, L., Odoni, A.R., Righi, L., Stamatopoulos, M.A. and Zografos, G. « A set of approximate and compatible models for airport strategic planning on airside and on landside », 2<sup>nd</sup> USA/Europe ATM R&D Seminar, Orlando, 1-4 December 1998
- [Ashford et Wright, 1979] Ashford Norman et Wright Paul, « Airport engineering », Ed. John Willey & Sons, 1979
- [Beasley et al., 1999] J.E. Beasley, M. Krishnamoorthy, Y.M. Sharaiha, D. Abramson, « The displacement problem and dynamically scheduling aircraft landings », 1999
- [Beasley et al., 2000] J.E. Beasley, M. Krishnamoorthy, Y. M. Sharaiha, D. Abramson, « Scheduling aircraft landings - the static case », Transportation Science, 34, pp. 180-197, 2000
- [Beasley et al., 2001] J. E. Beasley, J. Sonander, P. Havelock, « Scheduling aircraft landings at London Heathrow using a population heuristics », Journal of the operational research society, 2001
- [Bellman, 1957] Bellman R, « Dynamic programming », Princeton University Press, 1957
- [BETA] <http://www.dlr.de/beta>
- [Bianco et al., 1988] Bianco L., Ricciardelli S., Rinaldi G. et Sassano A. « Scheduling tasks with sequence dependent processing times », Naval Research Logistics, No. 35, pp 177-184, 1988
- [Bloat, 2000] Ahmet Bloat, « Procedures for providing robust assignment for arriving aircrafts », European Journal of Operations Research, No. 120, pp.63-80, Elsevier, 2000

- [Böhme, 1994] Böhme, D. « Improved airport surface traffic management by planning, Problems, concepts and a solution – TARMAC ». H. Winter (Ed.): Advanced technologies for air traffic flow management. DLR – seminar series, Bonn, Germany, April 1994, in lecture notes in control and information sciences, Springer Verlag, ISBN 3540198954
- [Bourdon, 1998] Bourdon Bernard, « MAESTRO – moyen d’aide à l’écoulement séquencé du trafic », STNA, Revue technique, No. 55, Novembre, 1998
- [Brazile et Swigger, 1988] Brazile P et Swigger K. « GATES : an airline gate assignment and tracking system », IEEE Expert, No. 3, Vol. 2, pp 33-39, 1988
- [Caisso, 2001] Philippe Caisso, « ADS-B Automatic Dependent Surveillance – Broadcast », Revue Technique, STBA, No. 60, pp 3-15, 2001
- [Carr et al., 1998] Carr Gregory, Erzberger Heinz et Neuman Frank. « Airline arrival prioritization in sequencing and scheduling », 2<sup>nd</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Orlando, 1-4 Décembre 1998
- [Carr, 2000] Carr, F. « Stochastic modelling and control of airport surface traffic », SM. Thesis Electrical Engineering and Computer Science, MIT, Cambridge, MA., 2000
- [Cheng, 1997] Yu Cheng, « A knowledge-based airport gate assignment system integrated with mathematical programming », Computers Industrial Engineering, Vol. 32, No. 4, pp. 837-852, Elsevier, 1997
- [Cheng, 1998a] Yu Cheng, « A rule-based reactive model for the simulation of aircraft on airport gates », Knowledge-Based Systems, Vol. 10, pp. 225-236, Elsevier, 1998
- [Cheng, 1998b] Yu Cheng, « Solving push-out conflicts in apron taxiways of airports by a network-based simulation », Computers Industrial Engineering, Vol. 34, No. 2, pp. 351-369, Elsevier, 1998
- [Ciufudean, 2002] Ciufudean Călin, « Sisteme cu evenimente discrete pentru modelarea traficului feroviar », Ed. Matrix Rom, ISBN 973-685-383-7, București, 2002
- [CPLEX] CPLEX Optimization Inc., « Using the CPLEX callable library (versio 3.0) », CPLEX Optimizations Inc., USA, 1994
- [David et al., 1998] Davis Lee, Caroline Nelson et Gerald Shapiro, « The aviation system analysis capability airport capacity and delay models », NASA/CR-1998-207659, April 1998
- [de Weerd, 1999] Mathijs de Weerd, « Transport planning and scheduling », Delft University of Technology, 1999
- [DEFAMM] <http://www.cordis.lu/transport/src/defamrep.htm>
- [Desrochers et Soumis, 1989] Desrochers M, Soumis F, « A column generation approach to the urban transit crew scheduling problem », Transportation Science, No. 23, pp 1-13, 1989
- [Dijkstra, 1959] Dijkstra Edsger, « A note on two problems in connexion with graphs », Numerische Mathematik, Vol. 1, pp. 269-271, 1959

- 
- [Dippe, 1995] Dippe, D.A. « The DLR activities for development, test and evaluation of a ground movement and control system », AIAA-95-3369, in proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control conference, Baltimore, MD, August 1995
- [Drake, 1967] Drake W. « Fundamentals of applied probability theory », Ed. McGraw Hill, 1967
- [El Moudani et Mora-Camino, 2000] El Moudani Walid et Mora-Camino Félix, « A dynamic approach for aircraft assignment and maintenance scheduling by airlines », Journal of Air Transport Management, Vol. 6, No. 4, pp. 233-237, octobre 2000
- [Ernst et Krishnamoorthy, 2001] Andreas T Ernst and Mohan Krishnamoorthy, « Algorithms for Scheduling Aircraft Landings », 2001
- [Faye et al., 1998] Faye Roger, Sawadogo W, Achāibou Abdelkrim, Mora-Camino Félix et Pereira A. « DYPLEX : a large scale dynamical linear programming method », Rapprt LAAS, No. 98047, février 1998
- [Faye et al., 2000] Faye Roger, Sawadogo S, Mora-Camino Félix et Achāibou Abdelkrim. « A fuzzy modeling approach for the long term management of water resource systems », 9th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, San Antonio, Etats-Unis, pp. 499-504
- [Florian, 1976] Florian M, « Traffic equilibrium methods », Ed. Springer-Verlag, Lecture notes in economics and mathematical systems, Heidelberg, 1976
- [Fox, 1987] Fox M. « Constraint directed search: a case study of job-scheduling », Research notes in Artificial Intelligence, pp. 1-184, 1987
- [Fulkerson, 1961] Fulkerson D. R., « An out-of-kilter method for minimal cost flow problems », Journal S.I.A.M., Vol. 9, No. 1, pp 18-27
- [Gazis et Potts, 1963] Gazis D.C, Potts R.B., « The oversaturated intersection », Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Traffic Theory, London, 1963, pp. 221-237
- [Gilbo et Howard, 2000] Gilbo, E.P. and Howard, K.W. « Collaborative optimisation of airport arrival and departure traffic flow management strategies for CDM », 3<sup>rd</sup> USA/Europe ATM R&D Seminar, Naples, Italy, 13-16 June 2000
- [Gilbo, 1991] Gilbo, E.P. « Airport capacity estimates for various weather conditions », ATMS/ETMS Project Memorandum, Unisys Corporation and Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, MA, 1991
- [Gilbo, 1993] Gilbo, E.P. « Airport capacity : representation, estimation, optimisation », IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 1, No. 3, September 1993
- [Goldberg, 1989] Goldberg David, « Genetic algorithms in search, optimization and machine learning », Ed. Addison-Wesley, 1989
- [Gondrant et Minoux, 1995] Gondrant M et Minoux M, « Graphes et algorithmes », Ed. Eyrolles, Paris, 1995
- [Gotteland et al. 2001] Jean-Baptiste Gotteland, Nicolas Durand, Jean-Marc Alliot, Erwan Page, « Aircraft ground traffic optimisation », ATM 2001
-

- [Gotteland, 2004] Jean-Baptiste Gotteland, « Optimisation du trafic au sol sur les grands aéroports », Thèse INP Toulouse, 2004
- [Grigoriadis et Khachiyan, 1994] Grigoriadis D et Khachiyan G. « Fast approximation schemes for convex programs with many blocks and coupling constraints », *SIAM Journal of optimization*, Vol. 4, No. 1, pp. 86-107, 1994
- [Hanghani et Chen, 1998] Ali Haghani and Min-Ching Chen, « Optimizing gate assignments at airport », *Transportation Research Part A*, Vol. 32, No. 6, pp. 437-454, Elsevier, 1998
- [Herbert et Dietz, 1997] Herbert, E.J. and Dietz, D.C. « Modelling and analysis of an airport departure process », *Journal of Aircraft*, Vol.34(1), January-February 1997
- [Hillier et Lieberman, 2001] Hillier F et Lieberman G. « Introduction to operations research », Ed. McGraw Hill, New York, 2001
- [Horonjeff, 1975] Horonjeff, « Planning and design of airports », Mac Graw-Hill, 1975
- [Hwang, 1979] Hwang C. « Multiple objective decision making – method and application », Ed. Springer, New-York, 1979
- [Idris et al., 1998] Husni R. Idris, Bertrand Delcaire, Ioannis Anagnostakis, William D. Hall, John-Paul Clarke, R. John Hansman, Eric Feron, Amedeo R. Odoni, « Observations Of Departure Processes At Logan Airport To Support The Development Of Departure Planning Tools », 2nd USA/EUROPE AIR TRAFFIC MANAGEMENT R&D SEMINAR, Orlando, 1st - 4th December 1998
- [Idris, 2001] Husni Rifat Idris, « Observation and analysis of departure operations at Boston Logan international airport », Ph.D. Thesis, MIT, February 2001.
- [Jimenez et Marzal, 1996] Jimenez Victor et Marzal Andres, « Computing the k shortest paths : a new algorithm and an experimental comparison », 1996
- [Jo et al., 1997] Jo G, Jung J et Yang C. « Expert systems for scheduling in an airline gate allocation », *Expert systems with applications*, No. 13, Vol. 4, pp 275-282, 1997
- [Jo et al., 2000] Jo Geun-Sik, Jong-Jin Jung, Ji-Hoon Koo, and Sang-Ho Hyun, « Ramp activity expert system for scheduling and coordination at an airport », *AI Magazine*, American Association for Artificial Intelligence, 2000
- [Jung et al., 1997] Jung J, Yang J et Jo G. « RACES: Ramp activity coordinatin expert system », *Intelligent processing on manufacturing materials*, Gold Coast, Australie, 14-17 Juilet, 1997
- [Klein et al., 2001] Kurt Klein, Michael Roeder, Hassina Maycroft. « Current research projects on Airport Surface Movement Guidance and Control Systems », *Air & Space Europe*, Vol. 3, No. 314, pp. 271-274, 2001
- [Lavoire et al., 1988] Lavoire S, Minoux M, Odier E, « A new approach for crow piring problems by column generation with an application to air transportation », *European Journal of Operational Research*, No. 35, pp 45-58, 1988
- [Lawson, 1998] Lawson, D. « Surface movement advisor », *Journal of ATC*, January-March, pp. 25-27, 1998

---

[Lorenzo et al., 1999] Lorenzo Brunetta, Luca Righi et Giovanni Andreatta, « An operations research model for the evaluation of an airport terminal : SLAM (simple landside aggregate model) », *Journal of Air Transport Management*, pp. 161-175, No. 5, 1999

[LPSolve] [http://groups.yahoo.com/group/lp\\_solve/](http://groups.yahoo.com/group/lp_solve/)

[Marin et al., 2002] Angel Marin Gracia, Salmeron J et Velasquez J. « Airport management, taxi planning », *International conference on operations research for development*, Chennai, Inde, 2002

[Marin, 2003] Angel Marin Gracia, « Column generation algorithms for nonlinear optimization », *Optimization*, Vol. 52, No. 2, pp. 171-200, 2003

[Mathaisel et Idris, 1998] Dennis F.X. Mathaisel, Husni Idris. « Aircraft ground movement simulation ». *Operations research in the airline industry*, ed. G. Yu, Kluwer 1998, pp. 189-227

[Minoux, 1982] Minoux Michel, « Un algorithme polynomial pour les problèmes de flots à coûts quadratiques et applications », *CNET*, France, 1982

[Minoux, 1984] Michel Minoux, « A polynomial algorithm for minimum quadratic cost flow problems », *European Journal of Operations Research*, No. 18, pp.377-387, 1984

[Newell, 1979] Newell G. F., « Airport capacity and delays », *Transportation Science*, Vol. 13, No. 3, pp.201-241, 1979

[Nuria, 2002] Nuria Alloza, « Airport ground traffic simulator », *ENAC*, mai 2002

[OACI, 1986] Doc 9476-AN/927, *Organisation de l'Aviation Civile Internationale*, 1986

[OACI, 1997] « Annexe 14 », *Organisation de l'Aviation Civile Internationale*, 1997

[OPAL] <http://www.nlr.nl/pulic/hosted-sites/opal>

[Orlin, 1996] Orlin James, « A polynomial time primal network simplex algorithm for minimum cost flows », *7<sup>th</sup> ACM-SIAM symposium on discrete algorithms*, Atlanta, Etats-Unis, pp. 474-481, 1996

[Pearl, 1990] Pearl Judea, « Heuristique », *Ed. Cepadues*, Toulouse, 1990

[Pesic 2001] Brankica Pesic, « Optimisation de la circulation des aéronefs au sol », *rapport de DRU à l'INPT*, juin 2001

[Prins et al., 2003] Prins C, Lacomme P et Sevaux M. « Algorithmes de graphes », *Ed. Eyrolles*, ISBN 2-212-11385-4, 2003

[Prosser, 1993] Prosser P. « Domain filtering can degrade intelligent backtracking search », *Proceedings of the 13<sup>th</sup> international conference on artificial intelligence*, Menlo Park, USA, pp 262-267, 1993

[Psaraftis, 1980] Psaraftis H., « A dynamic programming approach for sequencing groups of identical jobs », *Operations Research*, No. 28, pp 1347-1359, 1980

[Pugh, 1992] Pugh W. « The omega test : a fast and practical integer programming algorithm for dependence analysis », *Comm. ACM*, Vol. 35, No. 8, pp. 102-114, 1992

- 
- [Pujet et al., 1999] Nicolas Pujet, Bertrand Delcaire, Eric Feron. « Input-output modeling and control of the departure process at congested airports », American Institute of Aeronautics and Astronautics, 99-4299
- [Shumsky, 1997] Shumsky, R.A. « Real-time forecast of aircraft departure queues », Air traffic control quarterly, Vol. 5(4), pp. 281-308, 1997
- [SIMMOD] <http://www.atac.com/simmod>
- [Smeltink et al., 2003] Smeltink W, Soomer M, de Waal R et Rob van der Mei. « Optimisation of airport taxi planning », Vrije Universiteit, Pays Bas, 2003
- [STBA, 1975] « Capacité du système aéroportuaire – Manuel de capacité – pistes », Service Technique des Bases Aériennes, juillet 1975
- [STBA, 1978] « Manuel de capacité piste – Tome I », Service Technique des Bases Aériennes, janvier 1978
- [Storer et al., 1992] Storer Robert, Wu David et Vaccari Renzo. « New research spaces for sequencing problems with application to job shop scheduling », Management Science, Vol. 38, No. 10, pp. 1495-1509, 1992
- [Swedish, 1981] Swedish W. J., « Upgraded FAA airfield capacity model », The MITRE Corp., Tech. Rep. MTR-81W16, Vol. 1 et 2, 1981
- [Taillard et al., 2001] Taillard D, Gambardella M, Gendreau M et Potvin JY. « Adaptive memory programming : a unified view of metaheuristics », European Journal of operations research, No. 135, pp. 1-16, 2001
- [Texeira et al., 1992] Texeira, B. Roberto, Pererira, A. Lopes, Mora-Camino, Félix. « An heuristic approach for improved departire scheduling at airports ». Congrès Ibéro-Latino-Américain de Recherche Operationnelle, Mexico, Octobre, 1992
- [THEATRE, 2002] THEATRE , « Gate to Gate WEB », GTC1/2000/28023, 2002
- [Vallée, 2001] Jean-Charles Vallée, « L'évolution de la surveillance des mouvements au sol sur les aéroports », Revue Technique, STBA, No 61, pp 17-39, 2001
- [Viser et Roling, 2000] Viser H et Roling P, « Optimal surface traffic planning using mixed integer linear programming », Delft University of Technology, 2000
- [Völckers et al., 1993] Völckers, U., Brokof, U., Dippe, D. and Schubert, M. « Contributions of DLR to air traffic capacity enhancement within a terminal area », AGARD meeting on Machine Intelligence in Air Traffic Management, May 1993
- [Yan et al., 2002] Shangyao Yan, Chi-Yuan Shieh, Miawjane Chen. « A simulation framework for evaluating airport gate assignments », Transportation Research Part A, 2002
- [Yan et Huo, 2001] Shangyao Yan, Cheun-Ming Huo. « Optimization of multiple objective gate assignment », Transportation Research Part A No.35, pp. 413-432, Elsevier, 2001

## Résumé

Au cours des dernières décennies, la demande de trafic au niveau des aéroports a augmenté régulièrement à tel point que le trafic au sol est devenu critique pour la sécurité et l'efficacité des opérations aéroportuaires.

Cette thèse propose une approche à deux niveaux pour l'analyse et l'optimisation du trafic avion au sol sur les aéroports. Elle est divisée en trois parties:

- La première partie introduit la problématique générale et son environnement
- La deuxième partie traite la gestion à moyen terme du trafic au sol des avions. Une approche globale pour estimer la capacité théorique et la capacité pratique du trafic avion est proposée. Celle-ci met en œuvre une approche d'optimisation du flux dans un réseau qui conduit à la formulation de différents problèmes de programmation mathématique
- La troisième partie traite du niveau tactique et une approche adaptative est développée pour définir les routes et les horaires associés aux mouvements d'arrivée ou de départ des avions. Une approche de résolution opérationnelle est alors proposée.

## Mots-clés :

Recherche opérationnelle, Routage, Systèmes adaptatifs, Capacité aéroportuaire, Gestion du trafic, Transport aérien

## Abstract

The airport traffic demand has been increasing steadily over the last decades making ground traffic at airports a critical issue with respect to security and efficiency. This thesis presents a multilevel approach for the analysis and the optimisation of airport ground traffic operations.

This thesis is divided in three parts:

- the first part introduces the overall problematic and its environment,
- the second part of the thesis deals with the medium term planning level. A global approach to estimate the theoretical as well as the practical airside capacity at airports, is proposed. This approach is based on a mathematical network representation which allows to take into account the structure of the ground traffic system and the resolution of a set of large mathematical programming which can interact with traffic simulators,
- the third part of the thesis deals with the short term tactical level. An adaptive approach to manage at the tactical level the routing and scheduling of arriving and departing traffic. An operational approach is then proposed to solve the corresponding optimization problem.

## Keywords :

Operations research, Routing, Adaptive systems, Airport capacity, Traffic management, Air Transport